

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FRAÇÕES DE CARBONO E NITROGÊNIO EM SOLO
CULTIVADO COM PLANTAS DE COBERTURA EM PRÉ-
SAFRA DE MILHO**

Amanda Manduca Rosa da Silva
Engenheira Agrônoma

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FRAÇÕES DE CARBONO E NITROGÊNIO EM SOLO
CULTIVADO COM PLANTAS DE COBERTURA EM PRÉ-
SAFRA DE MILHO**

Discente: Amanda Manduca Rosa da Silva

Orientadora: Profa. Dra. Mara Cristina Pessôa da Cruz

**Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp,
Câmpus de Jaboticabal, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Mestre em Agronomia (Ciência do Solo)**

2022

S586f

Silva, Amanda Manduca Rosa da

Frações de carbono e nitrogênio em solo cultivado com plantas de cobertura em pré-safra de milho / Amanda Manduca Rosa da Silva. -- , 2023

44 f. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, Orientadora: Mara Cristina Pessôa da Cruz

1. Fertilidade do solo. 2. Matéria orgânica. 3. Solos Manejo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: FRAÇÕES DE CARBONO E NITROGÊNIO EM SOLO CULTIVADO COM PLANTAS DE COBERTURA EM PRÉ-SAFRA DE MILHO

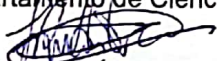
AUTORA: AMANDA MANDUCA ROSA DA SILVA

ORIENTADORA: MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



Profa. Dra. MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ (Participação Presencial)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal



Prof. Dr. JOSÉ RICARDO MANTOVANI (Participação Presencial)
Fundação de Ensino e Tecnologia de Alfenas-FETA / Faculdade de Agronomia da Universidade José do Rosário Vellano-Unifenas - Alfenas/MG



Pesquisadora Dra. DENISE DE LIMA DIAS DELARICA (Participação Presencial)
Álamos Ambiental / São Paulo/SP

Jaboticabal, 26 de julho de 2022

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Amanda Manduca Rosa da Silva nasceu em Ibitinga/SP, em 14 de fevereiro de 1996. Em fevereiro de 2015 ingressou no curso de Engenharia Agrônômica na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, câmpus de Jaboticabal, e em março de 2020, obteve o título de Engenheira Agrônoma. Durante a graduação foi bolsista de iniciação científica pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) de janeiro a dezembro de 2017 e de outubro de 2018 a novembro de 2019 desenvolvendo, nesses respectivos períodos, os projetos “Agregação e carbono orgânico de Latossolo Vermelho sob sistemas de cultivo e mata” e “Mineralização de nitrogênio em solos adubados com vinhaça”. Em março de 2020 iniciou o curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), pela mesma instituição, sendo bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

“Com Deus existindo, tudo dá esperança: sempre um milagre é possível, o mundo se resolve” (Grande Sertão: Veredas, Guimarães Rosa)

"Que a tua vida não seja uma vida estéril. Sê útil. Deixa rasto. Ilumina com o resplendor da tua fé e do teu amor."
(Caminho, 1, São Josemaria Escrivá)

Ao professor Itamar Andrioli (*In memoriam*)

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da minha vida, pelo consolo em todos os momentos e por me agradecer com pessoas tão especiais.

À Maria Santíssima, pelas minhas preces, por intercessão a seu Divino Filho, sempre ouvidas.

Aos meus pais, Luiz Antônio Rosa da Silva e Maria Helena Ferreira Manduca Rosa da Silva, que tanto abdicaram para a minha formação e por todo o amor que me oferecem.

Ao meu noivo, Yves Soares Menon, por ser a minha escada para o céu. Sua bondade comigo, eu não consigo contar aqui.

À minha irmã, Fernanda Manduca Rosa da Silva, pelo afeto e incentivo.

Aos meus avós, Sebastião Ferreira Manduca e Luzia Savan Manduca, pelo exemplo de amor e determinação.

A toda a minha família, pelo suporte, amor e orações.

À minha orientadora, Mara Cristina Pessôa da Cruz, pelos ensinamentos – profissionais e pessoais – eternos, pela convivência tão enriquecedora durante esses anos e por todos os esforços que permitem a realização de nossas pesquisas e estudos.

Ao professor Itamar Andrioli (*In memoriam*), idealizador do experimento em que foram coletadas as amostras de solo avaliadas.

Aos membros da banca do exame geral de qualificação, Prof. Dr. Manoel Evaristo Ferreira e Dr. Renato Yagi, pelas contribuições que muito me ajudaram para redação final deste trabalho.

Ao meu amigo Vinicius Augusto Filla, não apenas pela participação marcante nas etapas de campo e nas análises estatísticas, mas também pelos ensinamentos fortalecedores da minha fé.

À minha amiga, Mariele Monique Honorato Fernandes, por ser a extensão dos braços da Mãe aqui na terra e por ter um dos corações mais puros e bondosos que eu conheço.

À Ana Paula de Oliveira Sader, por facilitar a realização das análises elementares no Laboratório de Nutrição Animal.

Ao Gilberto Pelegrini, pela amizade e momentos partilhados ao longo desses anos.

Aos amigos do Laboratório de Fertilidade do Solo, pelo auxílio e companheirismo.

A Yves Menon, Vinicius Filla, Mariele Monique, Anderson Prates, Thayane Leonel, Gabriel Berci, Antônio Michael, Nubia Bertino, Luiz Silva e Henrique Laurito, pela valiosa ajuda nas coletas de solo.

À Laura Aguiar, pela prontidão em me ajudar com as etapas finais das análises laboratoriais.

Aos meus amigos Guilherme Rodrigues Viera e Matheus Flavio da Silva, que permanecem em meu coração.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), por ter sido uma mãe, deixando-me confiante, fortalecida e segura. Aos seus professores, coordenadores e funcionários, pelos ensinamentos, oportunidades e apoio técnico-científico.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE), pela ajuda na condução do experimento.

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

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

SUMÁRIO

	Página
Resumo	ii
Abstract	iii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Plantas de cobertura e matéria orgânica do solo	3
2.2 Formas lábeis da matéria orgânica do solo	5
2.2.1 C e N da biomassa microbiana do solo	5
2.2.2 C e N das frações granulométricas da matéria orgânica do solo	8
3. MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1 Caracterização geral do experimento – solo e clima	10
3.2 Histórico da área, tratamentos e delineamento experimental	12
3.3 Instalação e condução do experimento na safra 2020/2021	12
3.4 Avaliações	14
3.4.1 Caracterização das plantas de cobertura	14
3.4.2 C total e N total do solo	15
3.4.3 C e N da biomassa microbiana do solo	15
3.4.4 Fracionamento físico do C e do N orgânico	16
3.5 Tratamento estatístico dos dados	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
4.1 Carbono e nitrogênio total do solo	18
4.2 C e N da biomassa microbiana do solo	22
4.3 Fracionamento físico do C e do N orgânico	27
5. CONCLUSÕES	31
6. REFERÊNCIAS	32

FRAÇÕES DE CARBONO E NITROGÊNIO EM SOLO CULTIVADO COM PLANTAS DE COBERTURA EM PRÉ-SAFRA DE MILHO

RESUMO – Na busca pela qualidade de solo é preciso aumentar os teores de carbono e favorecer os processos de transformação das frações da matéria orgânica diretamente associadas ao armazenamento e à disponibilização de nutrientes. O objetivo com este trabalho foi avaliar formas lábeis e estáveis de carbono e de nitrogênio do solo após 20 anos de cultivo de plantas de cobertura em sucessão com milho. O experimento está instalado em Latossolo Vermelho distrófico típico de textura argilosa em delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas e quatro repetições. Os tratamentos são as plantas de cobertura (milheto, mucuna-cinza, crotalária-júncea, feijão-de-porco e vegetação espontânea) cultivadas em pré-safra e adubadas com 120 kg ha⁻¹ N-ureia em cobertura do milho. No ano das avaliações (safra 2020/2021), as plantas de cobertura foram amostradas durante o florescimento para avaliação da produção e caracterização químico-bromatológica e, então, dessecadas. O milho foi semeado em seguida e as amostras de solo foram coletadas aos 7, 52 e 97 dias após a dessecação das plantas de cobertura, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade. Foram avaliados carbono e nitrogênio totais (COT e NT) e as formas de ambos associadas à biomassa microbiana do solo (C-BMS e N-BMS), particuladas (COp e NOp) e associadas aos minerais (COam e NOam). Em relação ao pousio, a sucessão mucuna-cinza/milho favoreceu o acúmulo de C e N nas frações estáveis (COT, NT e NOam) e lábeis (C-BMS, COp e NOp) na camada superficial do solo (0-5 cm), devido às características químicas combinadas de alta concentração de N e de lignina presentes nos resíduos vegetais da mucuna-cinza. Além disso, o cultivo de plantas de cobertura promoveu melhoria da qualidade do solo, demonstrando ser uma estratégia eficiente para sustentabilidade dos sistemas produtivos agrícolas.

Palavras-chave: biomassa microbiana do solo, carbono e nitrogênio orgânico particulados, gramíneas, leguminosas, plantio direto

CARBON AND NITROGEN FRACTIONS IN SOIL CULTIVATED WITH COVER CROPS IN CORN PRE-HARVEST

ABSTRACT – In the search for soil quality, it is necessary to increase carbon levels and favor the processes of transformation of organic matter fractions directly associated with the storage and availability of nutrients. The objective with this work was to evaluate labile and stable forms of carbon and nitrogen in the soil after 20 years of cultivation of cover crops in rotation with corn. The experiment is installed in a Rhodic Hapludox, and the cover crops evaluated are millet, velvet bean, sunn hemp, jack bean and spontaneous vegetation (fallow). In the year of evaluations (2020/2021 harvest), cover crops were sampled during flowering to evaluate production and chemical-bromatological characterization and then dried. Corn was then sown and soil samples were collected at 7, 52 and 97 days after desiccation of the cover crops, in layers 0-5, 5-10 and 10-20 cm depth. Total organic carbon and nitrogen (TOC and TN) and the forms of both associated with soil microbial biomass (C-SMB and N-SMB), particulate (POC and PON) and mineral-associated (MAOC and MAON) were evaluated. Regarding fallow, the velvet bean/corn succession proved to be favorable for the accumulation of C and N in the stable (COT, TN and MAON) and labile (C-SMB, POC and PON) fractions in the surface layer of the soil (0-5 cm), due to the combined chemical characteristics of high concentration of N and lignin presente in the vegetal residues of velvet bean. In addition, the cultivation of cover crops improved soil quality, proving to be an efficient strategy for the sustainability of agricultural production systems.

Keywords: soil microbial biomass, particulate organic carbon and nitrogen, grasses, legumes, no-tillage

1. INTRODUÇÃO

Com o uso de práticas convencionais de manejo, nas quais o solo é revolvido por aração e gradagem, ocorre, de modo geral, diminuição dos estoques de carbono orgânico total (COT), e esse fato normalmente vem acompanhado da diminuição da produtividade. Em contrapartida, ações conservacionistas de manejo, que visam o revolvimento mínimo do solo e a manutenção dos resíduos vegetais sobre a superfície, favorecem o aumento ou a manutenção dos teores de COT e garantem, portanto, a qualidade do solo.

Diante disso, o cultivo de plantas de cobertura, combinado com sistemas de semeadura direta, tem se mostrado uma estratégia determinante da sustentabilidade dos sistemas produtivos agrícolas. As culturas utilizadas como plantas de cobertura, são cultivadas nos períodos previstos para pousio e geralmente pertencem ao grupo das leguminosas e das gramíneas. Com a inclusão das plantas de cobertura ocorre aumento da diversidade e da quantidade de resíduos vegetais, o que é muito benéfico para as propriedades químicas, biológicas e físicas do solo.

Uma característica marcante da adoção do cultivo de plantas de cobertura é o aumento dos teores de matéria orgânica do solo (MOS), embora o processo seja lento e muito dependente de fatores climáticos e edáficos. A lentidão na resposta e até mesmo a não resposta exige que a medida de MOS, de extrema importância, seja complementada com outras medidas para explicar mais eficientemente o funcionamento dos sistemas agrícolas. C e N associados à biomassa microbiana do solo e às frações particuladas da MOS estão entre as várias possibilidades de medidas complementares. Essas formas de C e de N são designadas de formas lábeis no sentido de apresentarem instabilidade bioquímica e, por isso, responderem mais rapidamente às alterações nos sistemas de manejo.

A cobertura vegetal, embora complexa, é um dos fatores que mais interfere na formação da MOS. O cultivo de leguminosas e de gramíneas impacta diferentemente a formação da MOS. As leguminosas, de modo geral, apresentam menor potencial produtivo de fitomassa do que as gramíneas, apresentam maior concentração de N e menor relação C/N. Tais características favorecem a atividade microbiana e, conseqüentemente, a formação de MOS.

A composição bioquímica das plantas é intrínseca à espécie, e as vias de formação da MOS a partir de um mesmo resíduo vegetal podem levar a resultados completamente diferentes em função de outros fatores (textura, topografia, condição climática etc). Espera-se, desse modo, que as frações lábeis da MOS também sejam afetadas pela espécie vegetal e, quantificando-as, pode-se chegar a uma estimativa de reciclagem de nutrientes e de qualidade de solo em curto prazo.

O impacto da qualidade do resíduo na formação da MOS é tão grande, que no mesmo experimento em que foram feitas as avaliações apresentadas no presente trabalho, foram observados, após dezessete anos de cultivo de plantas de cobertura em pré-safra de milho, na camada de 0-5 cm de profundidade, aumentos de 2,1 g kg⁻¹ e 2,3 g kg⁻¹ no COT do solo com cultivo de mucuna-cinza em relação, respectivamente, ao feijão-de-porco e ao milheto (Mandarino, 2020), apesar de, em avaliações anteriores na mesma área, a mucuna-cinza ter apresentado menor produção anual de biomassa (Bettiol, 2018). O efeito do cultivo de plantas de cobertura no COT, na camada de 0-5 cm de profundidade, descrito anteriormente é apresentando graficamente na Figura 1.

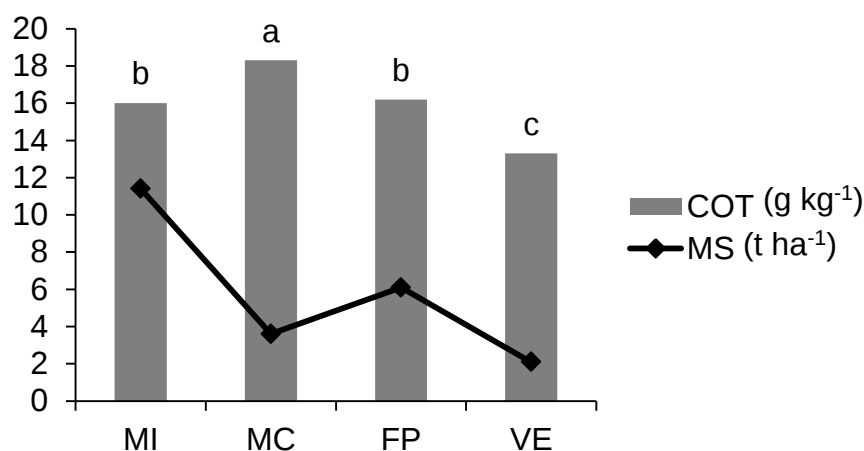


Figura 1. Carbono orgânico total (COT), em g kg⁻¹, e produção de matéria seca de parte aérea (MS), em t ha⁻¹, em área cultivada com plantas de cobertura em pré-safra de milho. MI: milheto, MC: mucuna-cinza, FP: feijão-de-porco e VE: vegetação espontânea. Médias com letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Fonte: Dados obtidos de Bettiol (2018) e Mandarino (2020).

Desse modo, partiu-se da hipótese que a decomposição dos resíduos de diferentes espécies de plantas de cobertura altera as frações lábeis do C e do N do solo de acordo com a composição bioquímica de cada resíduo. Os objetivos com esse trabalho foram avaliar os efeitos de plantas de cobertura cultivadas em pré-

safras de milho após 20 anos de adoção do sistema de cultivo nas: (i) formas lábeis de C e N do solo medidas como C e N associadas à biomassa microbiana do solo e à fração particulada da MOS; (ii) formas estáveis de C e N do solo medidas como C e N totais e associadas aos minerais do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Plantas de cobertura e matéria orgânica do solo

Até 2030, um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil é dobrar a produtividade e garantir sistemas sustentáveis de produção agrícola (ONU, 2015). É preciso, portanto, que o solo seja explorado com técnicas agronômicas que garantam, simultaneamente, o uso e a conservação desse recurso natural. Diante desse desafio, as práticas de agricultura conservacionista têm ganhado importância nos últimos anos e, dentre elas, destaca-se o cultivo de plantas de cobertura, uma velha prática agrícola, que está se tornando cada vez mais adotada, mundialmente (Romdhane et al., 2019).

As plantas de cobertura proporcionam múltiplos efeitos, como prevenção da erosão do solo e lixiviação de nutrientes, controle de plantas daninhas, favorecimento do crescimento de populações benéficas de microrganismos e sequestro de carbono atmosférico (Mbuthia et al., 2015; Poeplau e Don, 2015; Daryanto et al., 2018; Sturm et al., 2018; Thapa et al., 2018). Diversas espécies vegetais podem ser utilizadas como plantas de cobertura, mas, de forma geral, as mais empregadas são pertencentes aos grupos das leguminosas e das gramíneas.

As leguminosas são também denominadas de adubos verdes por aumentarem a concentração de N no solo devido ao processo de fixação biológica de N_2 atmosférico. Espécies como as mucunas e o feijão-de-porco são capazes de fixar até 157 e 190 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de nitrogênio, respectivamente (Wutke et al., 2014), o que pode resultar em economia de fertilizantes nitrogenados nas safras subsequentes. Em estudo de Amado et al. (2001), o cultivo de mucuna em pré-safra de milho proporcionou aumento no estoque de N do solo em 1,27 Mg ha⁻¹ na

camada de 0-20 cm, em relação ao sistema milho cultivado após pousio, em oito anos de adoção do sistema.

Além da entrada de N nos sistemas agrícolas, os resíduos vegetais das leguminosas apresentam maior teor de N e menor relação C/N, resultando em maior taxa de decomposição. Em contrapartida, as gramíneas apresentam menor teor de N e maior relação C/N, características que levam a uma taxa de decomposição mais lenta e, conseqüentemente, à maior cobertura e proteção contra a erosão do solo (Tiecher et al., 2016).

A inclusão de plantas de cobertura nos sistemas agrícolas, associada a um manejo adequado de solo, é uma estratégia importante para aumentar os teores de MOS, atributo-chave para manutenção ou aumento da qualidade do solo (Bünneman et al., 2018). Nas regiões tropicais, além do ganho de qualidade do solo, o aumento do teor de MOS é particularmente desejado, visto que é ela a principal geradora de cargas negativas no solo (CTC).

O incremento no teor de MOS com o cultivo de plantas de cobertura ocorre porque, dentro de cada sistema de manejo, o ganho líquido no reservatório de carbono orgânico resulta do balanço entre as entradas e as perdas, e é controlado por dois fatores: (i) a entrada de carbono no solo via restos de plantas e outros materiais orgânicos; (ii) a capacidade metabólica da biota do solo (Six et al., 2006).

No que diz respeito à entrada de carbono, o ganho líquido é dependente primeiramente da quantidade adicionada, mas a qualidade dos restos culturais, expressa pela sua composição bioquímica, também é um fator determinante. A qualidade dos resíduos vegetais é particularmente importante, visto que tem grande impacto na taxa e na eficiência com a qual os microrganismos degradam os resíduos e formam a MOS (Bending et al., 2002).

De acordo com a composição bioquímica, os resíduos são classificados como de “alta qualidade” (lábeis), que são decompostos rapidamente, e de “baixa qualidade” (recalcitrantes), decompostos lentamente (Cotrufo et al., 2013). Segundo Palm et al. (2001), resíduos de alta qualidade apresentam N > 2,5%, lignina < 15% e polifenóis < 4%. Além desses atributos, algumas relações também são utilizadas para associar qualidade do resíduo à taxa de decomposição, como C/N e lignina/N (Melillo et al., 1989), de forma que, geralmente, C/N e lignina/N elevadas são

conhecidas por aumentar a resistência do material à decomposição (Zech et al., 1997).

Há evidências de que as leguminosas, quando incluídas nas rotações de culturas em solos sob semeadura direta, desempenham um papel importante no acúmulo de C no solo (Boddey et al., 2010). Em estudo conduzido ao longo de 17 anos por Diekow et al. (2005), os estoques de C do solo aumentaram aproximadamente 8 Mg ha⁻¹ de C até 17,5 cm de profundidade nos tratamentos que continham leguminosas de verão (lablab e guandu) consorciadas com o milho.

A formação de MOS é dependente de N, visto que esse elemento é essencial para a síntese de substâncias húmicas (Stevenson, 1994). Entretanto, o N derivado das leguminosas mostrou ser mais eficiente para a formação de MOS do que o N proveniente da fertilização (Drinkwater et al., 1998). Desse modo, a liberação lenta e contínua do N dos resíduos vegetais das leguminosas parece desempenhar papel importante no acúmulo de MOS (Boodey et al., 2010).

Embora a MOS seja um dos principais indicadores de qualidade de solo, as mudanças em seu teor não são detectadas em curto prazo. Diante disso, a quantificação das frações lábeis tem ganhado importância nas últimas décadas, porque elas respondem mais rapidamente às alterações nos sistemas de manejo (Heitkamp et al., 2009; Rovira et al., 2010).

2.2 Formas lábeis da matéria orgânica do solo

2.2.1 C e N da biomassa microbiana do solo

A biomassa microbiana do solo (BMS), definida como a massa total de microrganismos vivos em um dado volume ou massa de solo (SSSA, 1997), contém de 1 a 5% do carbono orgânico do solo (Jenkinson e Laad, 1981) e de 2 a 6% do nitrogênio total do solo (Jenkinson, 1998). Embora pequena, é uma fração lábil importante da MOS, associada à decomposição dos resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes e fluxo de energia dentro do solo (Jenkinson et al., 2004). É frequentemente representada pelo carbono e pelo nitrogênio contidos na BMS (C-BMS e N-BMS, respectivamente) e, por ser uma fração que responde rapidamente

às mudanças de manejo, é considerada um indicador sensível de fertilidade e de qualidade do solo (Singh et al., 2007; Mbuthia et al., 2015).

A formação e a estabilização da MOS são dependentes da BMS, como demonstrado por Spence et al. (2011), que concluíram que 50% da MOS é derivada de produtos microbianos. Os resíduos vegetais fornecem energia (C) para o crescimento e manutenção da atividade microbiana, e, após a morte celular, parte desse C é transformado em MOS não viva (Miltner et al., 2012). Além disso, os resíduos microbianos, produtos finais da decomposição, estabilizam a MOS, pois oferecem resistência bioquímica ou física à degradação (Six et al., 2006).

As plantas de cobertura podem alterar o habitat do solo e, consequentemente, o habitat microbiano, ao afetar a forma química dos nutrientes, a profundidade de enraizamento, a quantidade e a qualidade dos resíduos vegetais, a liberação de exsudatos radiculares e a agregação do solo (Balota et al., 2014).

Em meta-análise com 81 estudos, Muhammad et al. (2021) constataram que o cultivo de plantas de cobertura levou a aumentos de 40% e 51% no C-BMS e no N-BMS, respectivamente, em comparação ao pousio. Os aumentos foram provavelmente devido a maior entrada de C e N pelos resíduos vegetais, dentro e sobre o solo (Chavarría et al., 2016; Schmidt et al., 2019), aumentando a disponibilidade de substrato e, consequentemente, estimulando o crescimento microbiano (Muhammad et al., 2021).

A qualidade dos resíduos vegetais, por sua vez, é tão importante quanto a quantidade. O teor de N e de polímeros estruturais, como a lignina, controlam os processos microbianos de mineralização-imobilização de N durante a decomposição (Heal et al., 1997). Em geral, as leguminosas, quando comparadas às gramíneas, têm maior teor de N, menor relação C/N e maior taxa de decomposição. Assim, as leguminosas e as gramíneas diferem em seus impactos sobre a comunidade microbiana devido às suas características distintas (Rocha et al., 2020).

Ao comparar a influência de diferentes resíduos na BMS, Mbuthia et al. (2015) afirmaram que o cultivo de ervilhaca, em comparação ao trigo e ao pousio, melhorou as respostas microbianas, como por exemplo, o N-BMS. Os autores ainda sugeriram que as melhorias microbianas e de qualidade de solo resultantes do cultivo de uma

planta de cobertura fixadora de N foram equivalentes à prática de adubação nitrogenada.

Alguns índices podem ser derivados do C-BMS e do N-BMS, como por exemplo, a razão entre carbono microbiano e carbono orgânico total (C-BMS/COT), conhecida como quociente microbiano, e a razão entre nitrogênio microbiano e nitrogênio total (N-BMS/NT). A razão C-BMS/COT é um índice do potencial de acúmulo de carbono da biomassa microbiana em relação ao carbono orgânico (Sparling, 1992; Rodrigues, 1999), que pode ser usado na avaliação de mudanças causadas por práticas agrícolas (Wardle, 1992). Já a razão N-BMS/NT indica a fração de N mineralizável, ou seja, expressa o potencial de fornecimento de N inorgânico para a próxima safra (McGill et al., 1988).

Franchini et al. (2007) verificaram que as rotações com proporções mais altas de leguminosas resultaram em maiores valores de C-BMS/COT. Xavier et al. (2006) associaram os maiores valores de C-BMS/COT obtidos em área de pastagem a maior conversão de carbono orgânico em carbono microbiano, indicando aumento de nutrientes por meio da BMS. Espera-se, portanto, que solos com melhor qualidade apresentem maiores proporções de C-BMS/COT (Kaschuk et al., 2010). Os maiores valores de N-BMS/NT em áreas sob mata nativa de Cerrado e sob pastagem consolidada há 22 anos, observados por Frazão et al. (2010), foram associados à maior eficiência e disponibilidade de ciclagem do N inorgânico em médio prazo (Xavier et al., 2006).

Outra medida frequentemente usada é a relação C/N microbiana, que é uma indicação da proporção relativa de fungos para bactérias. Alta relação C/N da BMS aponta que a comunidade microbiana contém maior proporção de fungos, ao passo que baixo valor sugere que as bactérias predominam (Campbell et al., 1991).

Considerando que os microrganismos desempenham papel fundamental na decomposição dos resíduos (Frazão et al., 2010), o conhecimento do efeito da quantidade e da qualidade dos diversos tipos de resíduos vegetais em função do manejo adotado sobre a BMS é de extrema importância.

2.2.2 C e N das frações granulométricas da matéria orgânica do solo

O C do solo é armazenado principalmente em duas grandes frações: matéria orgânica particulada (MOp) e matéria orgânica associada aos minerais (MOam) (Lavallee et al., 2019). Um dos métodos frequentemente utilizado para obtenção dessas frações é o proposto por Cambardella e Elliott (1992). Nele são separadas e obtidas, por meio de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio, a fração associada à areia (MOp > 53 μ m) e a fração associada ao silte e à argila (MOam < 53 μ m).

A MOp é a fração microbiologicamente ativa e lábil da MOS, formada por resíduos vegetais parcialmente decompostos (Cambardella et al., 2001; SSAA, 2008), sendo considerada um indicador muito sensível às mudanças induzidas pelo manejo do solo (Conceição et al., 2005; Duval et al., 2013). Por outro lado, a MOam representa a matéria orgânica mais humificada, que interage com as superfícies minerais, formando complexos organominerais (Bayer et al., 2009).

Tais frações são física e quimicamente distintas e, por isso, desempenham papéis diferentes no solo. De modo geral, a MOp representa um substrato facilmente decomponível pelos microrganismos (Bu et al., 2015) e é considerada uma das principais fontes de N disponível para as plantas em curto prazo (Jilling et al., 2020). Por outro lado, a MOam é a fração mais estável, representando um importante reservatório de nutrientes de liberação em longo prazo (Trumbore, 2009). Além disso, mais de 50% da MOS é constituída pela MOam (Stewart et al., 2008; Beare et al., 2014), evidenciando o papel crucial dessa fração para aumento dos teores de MOS (Conceição et al., 2013).

O uso de plantas de cobertura – em função das diferentes espécies vegetais que fornecem quantidade e qualidade de resíduos vegetais variáveis – é uma prática agrícola que impacta a MOS e suas frações, influenciando, consequentemente, na labilidade das formas de C e N, medidas como C e N orgânico particulados (COp e NOp, respectivamente). De modo geral, os estudos utilizam exclusivamente as quantificações do COp, porém as determinações de NOp podem fornecer informações valiosas sobre as características de ciclagem do N dentro dos sistemas (Wander, 2004).

Em avaliações de Conceição et al. (2005), os tratamentos com guandu/milho e mucuna/milho proporcionaram incrementos no COp de, respectivamente, 70,4% e 52,5% em relação ao campo natural na camada de 0-20 cm de profundidade. Esses mesmos tratamentos aumentaram o NOp em 114% e 74%, quando comparados ao campo natural. Segundo os autores, o aumento do estoque de N na fração particulada pode favorecer a disponibilidade desse nutriente às plantas por duas razões: (a) por ser uma fração de menor meia-vida, e (b) por estar concentrada na superfície, favorecendo a absorção deste nutriente pelas raízes das plantas.

O COp é uma fração que depende da entrada de matéria seca de resíduos vegetais e dos fatores que influenciam sua decomposição, como clima, qualidade do material e disponibilidade de nutrientes (Duval et al., 2013). De acordo com Faccin et al. (2016) e Ensinas et al. (2016), o aumento dos teores de COp nos sistemas de semeadura direta é atribuído a maior adição e acúmulo de resíduos vegetais.

Recentemente, as diferenças na composição química dos resíduos vegetais têm ganhado importância devido ao seu papel diferenciado no acúmulo dos teores de COp e de carbono orgânico associado aos minerais (COam) (Lian et al., 2016). Os resíduos de baixa qualidade, caracterizados pela maior concentração de lignina e alta relação C/N, tendem a favorecer o aporte de COp, enquanto os resíduos de alta qualidade, por oferecerem menor resistência à decomposição microbiana, favorecem o acúmulo mais rápido e eficiente de COam (Cotrufo et al., 2013).

Em experimento de incubação com resíduos vegetais de soja (raízes, hastes e folhas) marcados com ^{13}C , Lian et al. (2016) classificaram a taxa de incorporação do C dos resíduos ao COp como sendo raiz > haste > folha. Particularmente, o C derivado das raízes e retido no COp grosso (2000 – 250 μm) foi 73% e 264% maior do que o C derivado das hastes e das folhas, respectivamente. Os resultados obtidos pelos autores destacam a importância do C radicular (recalcitrante) para aumento dos teores do COp e, conseqüentemente, de melhora de qualidade de solo.

As plantas de cobertura, leguminosas e gramíneas, impactam diferentemente a distribuição do N nas frações da MOS e, conseqüentemente, na capacidade de armazenamento e disponibilidade desse nutriente. A inclusão de leguminosas em substituição ao pousio é uma alternativa eficaz para aumentar a concentração de N

nas frações da MOS e, conseqüentemente, no teor total do solo (Yao et al., 2021). Tal aumento pode contribuir para a redução significativa do uso de fertilizantes nitrogenados para a produção de alimentos, diminuindo, dessa forma, os impactos ambientais da agricultura.

Pelo exposto tem-se que as diferentes quantidades e qualidades dos resíduos vegetais deixados sobre e dentro do solo devido ao cultivo das plantas de cobertura podem influenciar o acúmulo de MOS. O fracionamento da MOS em seus compartimentos pode auxiliar a compreensão mais eficiente das modificações decorrentes dos diferentes usos e manejos do solo devido à maior sensibilidade dessas frações (Cambardella e Elliott, 1992; Bayer et al., 2004).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização geral do experimento – solo e clima

O experimento está instalado na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP), câmpus de Jaboticabal – SP. O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico de textura argilosa (Andrioli e Centurion, 1999). A caracterização química e granulométrica do solo antes da instalação do experimento e a caracterização química do solo vinte anos após a instalação do experimento (safra 2020/2021) são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. Os métodos de análise química utilizados estão descritos em Raij et al. (2001). A análise granulométrica foi feita segundo Camargo et al. (2009).

Tabela 1. Atributos químicos e granulometria do solo na área do experimento no ano de 2000.

Prof. cm	P-resina mg dm ⁻³	COT ¹ g kg ⁻¹	pH CaCl ₂	Ca ²⁺ mmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ mmol _c dm ⁻³	K ⁺ mmol _c dm ⁻³	H+Al	CTC	V %	Argila g kg ⁻¹	Areia g kg ⁻¹
0-5	32	13	4,5	14	8	4,0	42	68	38	474	499
5-10	35	10	4,4	11	6	3,0	42	62	32	497	481
10-20	58	9	4,3	11	5	2,3	42	60	30	504	467

¹ COT: carbono orgânico total

Tabela 2. Atributos químicos do solo vinte anos após a instalação do experimento (safra 2020/2021).

PC ¹	Prof. cm	P-resina mg dm ⁻³	MO g dm ⁻³	pH CaCl ₂	Ca ²⁺ mmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺ mmol _c dm ⁻³	K ⁺ mmol _c dm ⁻³	H+Al	CTC	V %
MI	0-5	35	30	5,1	20	13	6,3	36	75	52
	5-10	51	21	4,8	15	8	4,2	40	67	40
	10-20	36	16	4,4	10	5	2,1	43	60	28
MC	0-5	37	36	4,7	16	9	4,5	58	88	34
	5-10	47	21	4,3	12	4	3,0	45	64	30
	10-20	34	19	4,2	10	4	2,0	49	65	25
CJ	0-5	42	33	4,9	22	10	5,4	42	69	39
	5-10	47	23	4,6	19	7	3,9	45	68	34
	10-20	41	19	4,6	16	5	3,1	45	64	30
FP	0-5	49	34	5,1	28	12	6,8	36	83	57
	5-10	54	23	4,7	21	8	4,2	42	75	44
	10-20	44	19	4,5	14	4	2,3	43	63	32
VE	0-5	40	28	5,0	21	12	6,9	35	75	53
	5-10	45	19	4,7	15	8	4,9	39	67	42
	10-20	39	17	4,4	12	7	3,2	43	65	34

¹PC: planta de cobertura, MI: milheto, MC: mucuna-cinza, CJ: crotalaria-júncea, FP: feijão-de-porco, VE: vegetação espontânea.

O clima do local, segundo a classificação de Koppen-Geiger, é do tipo Aw, tropical úmido com estiagem no inverno. Os dados climatológicos durante o período de novembro/2020 a novembro/2021 são apresentados na Figura 2.

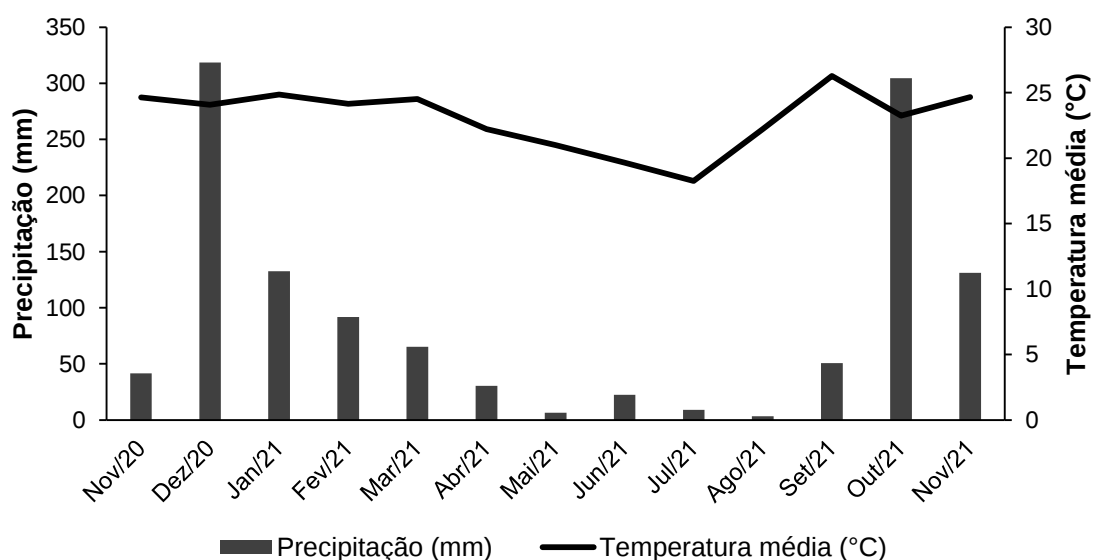


Figura 2. Temperatura média e precipitação pluvial durante o período de novembro/2020 a novembro/2021. Dados obtidos da Estação Agroclimatológica UNESP – FCAV.

3.2 Histórico da área, tratamentos e delineamento experimental

A área experimental vem sendo cultivada em semeadura direta desde a safra 1998/1999. No segundo semestre de 2000 foi instalado experimento combinando plantas de cobertura em pré-safra à cultura do milho e doses de N em adubação de cobertura. Em todos os anos, as plantas de cobertura foram semeadas no início das primeiras chuvas (geralmente nos meses de setembro e outubro) e foram dessecadas quimicamente em torno de sessenta dias após a semeadura, sendo, em seguida, semeado o milho. Entre a colheita do milho e a próxima semeadura das plantas de cobertura a área fica em pousio.

O experimento está instalado em delineamento em blocos casualizados, com parcelas subdivididas e quatro repetições. Os tratamentos principais, nas parcelas, são as plantas de cobertura em pré-safra à cultura do milho: milheto (*Pennisetum americanum*), mucuna-cinza (*Mucuna cinerea*), crotalária-júncea (*Crotalaria juncea*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), lablab (*Dolichos lablab*) e vegetação espontânea (pousio). Os tratamentos secundários, nas subparcelas, são quatro doses de N em cobertura no milho (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N-ureia). As parcelas medem 18 m x 7 m, e as subparcelas, 4,5 m x 7,0 m.

As avaliações apresentadas neste trabalho referem-se a amostras coletadas no vigésimo ano de cultivo de plantas de cobertura, nas parcelas cultivadas com milheto, mucuna-cinza, crotalária-júncea, feijão-de-porco e vegetação espontânea, adubadas com 120 kg ha⁻¹ de N-ureia, dose que atende à meta de produtividade do milho de 8-10 t ha⁻¹, considerando classe alta de resposta (Raij e Cantarella, 1997).

3.3 Instalação e condução do experimento na safra 2020/2021

A semeadura direta das plantas de cobertura foi realizada sobre os resíduos vegetais das safras anteriores e com mobilização do solo restrita à linha de semeadura, no dia 18 de novembro de 2020, sem adubação. Com exceção do feijão-de-porco, as espécies foram semeadas mecanicamente com espaçamento de 0,45 m nas entrelinhas, e a quantidade de sementes por metro linear foi,

respectivamente, 20, 9, 9 e 8 para milheto, mucuna-cinza, crotalária-júncea e feijão-de-porco.

No dia 18 de janeiro de 2021, 61 dias após a semeadura das plantas de cobertura, realizou-se amostragem da parte aérea das plantas de cobertura. No mesmo dia, foi realizada a dessecação química das plantas de cobertura, utilizando a mistura dos herbicidas glyphosate (4 L ha^{-1}) e clethodim ($0,5 \text{ L ha}^{-1}$).

No dia 25 de janeiro de 2021, 7 dias após a dessecação das plantas de cobertura, foi realizada a semeadura do milho (híbrido P4285VYHR), com espaçamento de 0,90 m nas entrelinhas, totalizando cerca de 55.500 plantas ha^{-1} . A adubação de semeadura foi feita com 28 kg ha^{-1} de N, 98 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 56 kg ha^{-1} de K_2O (350 kg ha^{-1} da fórmula 08-28-16+Zn). A adubação de cobertura do milho foi feita 28 dias após semeadura da cultura (estádio V4), utilizando como fonte a ureia, a qual foi aplicada manualmente, ao lado da linha de semeadura. O milho não foi colhido porque a produção foi muito comprometida pela falta de chuvas (Figura 2).

As amostras de solo foram coletadas em três épocas, com intervalos aproximados de 45 dias, precedidos de precipitação pluvial, iniciando aos 7 dias após a dessecação (DAD) das plantas de cobertura e, em seguida, aos 52 e 97 DAD. Em todas as coletas foram amostradas as camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade. As amostras foram obtidas a partir da coleta de 10 subamostras, na área útil de cada subparcela, nas entrelinhas do milho, com trado holandês. Parte do volume total de cada amostra foi armazenada em sacos de plástico tipo zip e conservada em geladeira a 4°C para as análises de C e N da biomassa microbiana do solo (C-BMS e N-BMS, respectivamente). A outra parte foi seca ao ar e passada em peneira (2 mm) para as análises de C e N total do solo e para o fracionamento físico do C e do N orgânico em: C orgânico particulado, N orgânico particulado, C orgânico associado aos minerais e N orgânico associado aos minerais.

Na Figura 3 são apresentadas cronologicamente as ações realizadas durante o período de condução experimental da safra 2020/2021.

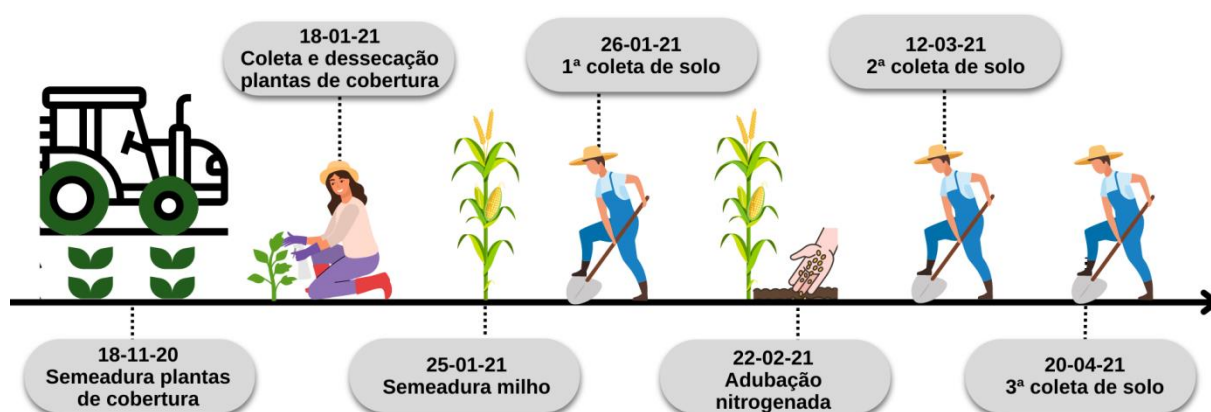


Figura 3. Representação esquemática das ações realizadas durante a safra 2020/2021.

3.4 Avaliações

3.4.1 Caracterização das plantas de cobertura

Para avaliação da produção de matéria seca, determinação de C, N e composição bromatológica das plantas de cobertura, foi realizada amostragem da parte aérea no momento do florescimento. Para milheto, crotalária-júncea e feijão-de-porco, a amostragem foi feita coletando a parte aérea de dois metros lineares. Para a mucuna-cinza, coletou-se a parte aérea das plantas em 2 m², empregando gabarito de 1 m², que foi lançado duas vezes na parcela. Para coleta da parte aérea da vegetação espontânea foi utilizado gabarito de 0,25 m², o qual foi lançado quatro vezes na parcela. Em todos os casos, as plantas foram cortadas rente ao solo.

O material coletado foi lavado em solução de detergente neutro 1 mL L⁻¹, com enxagues em água corrente e, em seguida, em água deionizada. As amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar (65-70 °C), como sugerido por Carmo et al. (2000), até ser obtida massa constante para estimativa da produção de matéria seca. Posteriormente, o material foi moído em moinho tipo Willey e utilizado nas determinações de C e N total, por combustão via seca em analisador LECO® CN

628, e de celulose, hemicelulose e lignina (Van Soest, 1994). A caracterização das plantas de cobertura é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Matéria seca, C, N, celulose, hemicelulose e lignina na parte aérea das plantas de cobertura cultivadas e da vegetação espontânea.

Planta de cobertura	MS t ha ⁻¹	C	N	Cel	Hemic	Lig	C/N	Lig/N
		-----%-----						
Milheto	7,0	44	1,5	37	31	4	29	3
Mucuna-cinza	2,1	45	3,8	30	14	10	12	3
Crotalária-júncea	4,6	44	2,1	45	12	10	21	5
Feijão-de-porco	3,4	44	3,8	27	14	7	12	2
Vegetação espontânea	3,5	43	1,5	35	24	6	29	4

MS: Matéria seca; C: Carbono; N: Nitrogênio; Cel: Celulose; Hemic: Hemicelulose; Lig: Lignina.

3.4.2 C total e N total do solo

As amostras foram moídas em almofariz de porcelana e peneiradas (60 mesh). Nelas, o carbono orgânico total (COT) e o nitrogênio total (NT) foram determinados em analisador elementar LECO® CN 628.

3.4.3 C e N da biomassa microbiana do solo

O carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS) e o nitrogênio da biomassa microbiana do solo (N-BMS) foram determinados pelo método da irradiação-extração (Islam e Weil, 1988). Para cada amostra, duas subamostras de 20 g de solo úmido foram pesadas e transferidas para tubos de vidro: metade para extração direta (amostras não irradiadas) e metade para irradiação (amostras irradiadas) em forno micro-ondas doméstico (Electrolux, modelo MEF41, tensão de alimentação 120 V e frequência das micro-ondas 2450 MHz). Considerando a energia necessária para promover a lise celular de 800 J g⁻¹ de solo (Islam e Weil, 1988), foi calculado o tempo necessário de irradiação (2 min) conforme a Equação 1:

$$t = \frac{r \times m \times t}{P} \quad (1)$$

Em que: t é o tempo necessário de incidência de irradiação (s); r é a quantidade de energia irradiada durante a incidência de irradiação (800 J g^{-1}); mt é a massa total das amostras a serem irradiadas (g); P é a potência real do aparelho (W).

Previamente, o forno micro-ondas foi calibrado com uma amostra de água deionizada com massa definida e a potência real do aparelho foi calculada seguindo a Equação 2:

$$P = \frac{Cp \times \Delta T \times m}{t} \quad (2)$$

Em que: Cp é a capacidade térmica da água ($4,184 \text{ J g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$); ΔT é a variação de temperatura final e inicial da água ($^{\circ}\text{C}$); m é a massa de água (g); t é o tempo de exposição da água à irradiação (s).

Para a extração foram adicionados, em ambas as amostras (não irradiadas e irradiadas), 50 mL de solução de K_2SO_4 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (Tate et al., 1988). Em seguida, as amostras foram transferidas para agitador horizontal (220 rpm) e agitadas por 30 min. Os extratos foram filtrados em papel filtro qualitativo para determinação do C-BMS por oxidação por via úmida (Silva et al., 2007a) e do N-BMS por digestão-destitilação-titulação (Silva et al., 2007b). A umidade de cada amostra foi determinada e corrigida. O C-BMS e o N-BMS foram calculados a partir da diferença entre as amostras irradiadas e não irradiadas, utilizando-se o fator de conversão $K_c = 0,33$ (Sparling e West, 1988) e $K_n = 0,54$ (Brookes et al., 1985), respectivamente, para C-BMS e N-BMS.

3.4.4 Fracionamento físico do C e do N orgânico

O fracionamento físico do carbono e do nitrogênio orgânicos do solo foi realizado empregando método proposto por Cambardella e Elliott (1992). Em copos plásticos (100 mL), foram pesados 10 g de solo (seco e peneirado), aos quais foram adicionados 30 mL de solução de hexametáfosfato de sódio 5 g L^{-1} e três bolinhas de plástico (1,41 g) para auxiliar a desagregação. As amostras foram colocadas em agitador rotativo a 220 rpm e agitadas por 15 horas para desintegração mecânica

dos agregados. A suspensão, então, foi lavada em peneira com malha de 53 μm até que a água de lavagem estivesse visualmente límpida.

O material retido na peneira ($> 53 \mu\text{m}$), constituído por resíduos orgânicos e fração areia, foi definido como particulado, e foi seco em estufa com circulação forçada de ar a 50 °C. Após secagem, a amostra foi moída em almofariz de porcelana, passada em peneira (60 mesh) e analisada quanto aos teores de C e N orgânico particulados (COp e NOp, respectivamente) em analisador elementar LECO® CN 628.

O C e o N orgânico associado aos minerais (COam e NOam, respectivamente) foram calculados pela diferença entre os teores de COT e COp (para COam) e entre NT e NOp (para NOam).

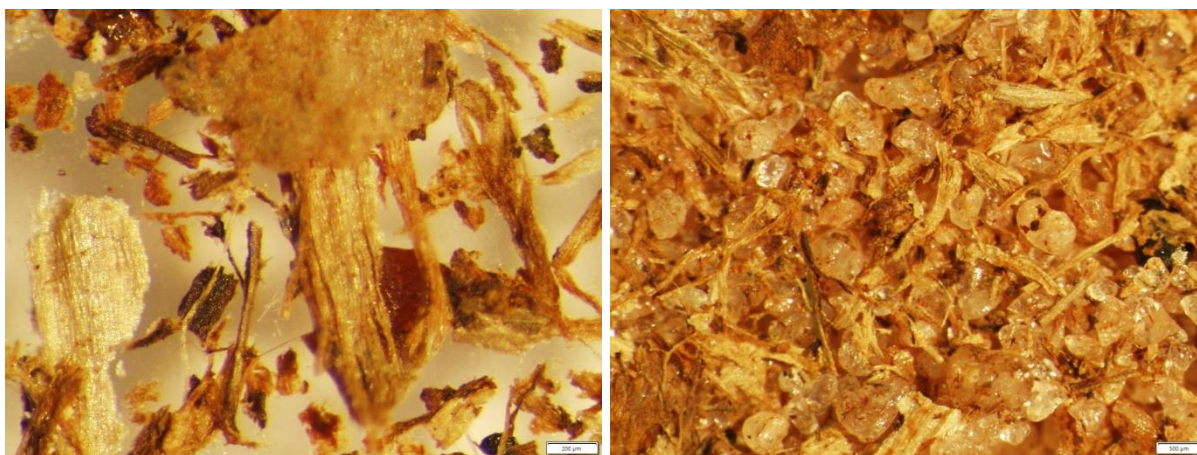


Figura 4. Imagens de matéria orgânica particulada associada à fração areia grossa e fina (2 – 0,105 mm) de amostra de solo coletada na área experimental na camada de 0-5 cm de profundidade. As imagens foram obtidas em microscópio de luz Olympus BX50 ligado a uma câmera DP72, usando o software de captura de imagens CellSens.

3.5 Tratamento estatístico dos dados

Os dados foram submetidos à análise de *outliers* pelo teste generalizado ESD (Rosner, 1983) e, também, à verificação do atendimento aos pressupostos da análise de variância (ANOVA) (normalidade dos resíduos, pelo teste de Levene e homogeneidade das variâncias, pelo teste de Jarque-Bera). Quando um dos pressupostos foi violado, realizou-se a transformação dos dados, para atender os

requisitos da ANOVA. Os dados foram analisados por meio de ANOVA de medidas repetidas, utilizando a correção de Greenhouse-Geisser (Greenhouse e Geisser, 1959), e cada camada de solo foi avaliada isoladamente. O fator principal foi as plantas de cobertura (PC), e o secundário, as épocas de coleta do solo (E). Quando o teste F foi significativo ($p < 5\%$), foi realizado teste de Tukey para comparação de médias. Quando a interação foi significativa, realizou-se o desdobramento. As análises foram feitas utilizando-se o software SpeedStat (SPEED Stat, UFV, Viçosa, Brasil).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Carbono e nitrogênio total do solo

Houve efeito do cultivo de plantas de cobertura e da época de coleta de solo nos teores de carbono orgânico total (COT) nas camadas de 0-5 cm e 5-10 cm de profundidade (Tabela 4).

Tabela 4. Carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT) e relação C/N em função do cultivo de plantas de cobertura (PC) e da época de coleta de solo (E).

PC	COT (g kg ⁻¹)			NT (g kg ⁻¹)			C/N solo		
	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
MI	14,97 b	12,52 a	11,62	1,01 b	0,77 ab	0,73	15,16 a	16,47 a	16,03
MC	16,41 a	12,62 a	11,44	1,26 a	0,89 a	0,70	13,20 b	14,32 b	16,59
CJ	14,93 b	12,31 ab	10,96	1,01 b	0,79 ab	0,64	14,77 a	15,73 ab	17,26
FP	15,30 ab	12,49 a	11,72	1,03 b	0,79 ab	0,72	14,87 a	15,94 ab	16,30
VE	12,81 c	10,97 b	10,36	0,80 c	0,69 b	0,62	16,12 a	16,43 a	16,78
E									
7	15,60 a	12,82 a	11,11	1,02	0,79 ab	0,63 b	15,73 a	16,53 a	17,76 a
52	14,69 ab	11,68 b	10,96	0,98	0,74 b	0,66 b	15,15 a	16,24 a	16,52 b
97	14,35 b	12,05 ab	11,59	1,07	0,83 a	0,75 a	13,58 b	14,56 b	15,49 b
Teste F									
PC	17,51 ^{**}	4,50 [*]	2,67 ^{NS}	19,77 ^{**}	5,64 ^{**}	1,81 ^{NS}	9,86 ^{**}	5,60 ^{**}	0,72 ^{NS}
E	4,61 [*]	4,65 [*]	3,45 ^{NS}	1,95 ^{NS}	5,25 [*]	12,76 ^{**}	28,20 ^{**}	10,45 ^{**}	13,86 ^{**}
PC x E	1,32 ^{NS}	0,90 ^{NS}	1,18 ^{NS}	1,63 ^{NS}	2,00 ^{NS}	0,93 ^{NS}	1,71 ^{NS}	1,26 ^{NS}	1,84 ^{NS}

^{**}, ^{*} e ^{NS}: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste F, respectivamente. Médias seguidas de letras iguais na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. MI: milheto, MC: mucuna-cinza, CJ: crotalária-júncea, FP: feijão-de-porco e VE: vegetação espontânea.

Na camada de 0-5 cm de profundidade, o cultivo de mucuna-cinza resultou em maior teor de COT em relação às demais plantas de cobertura, exceto ao feijão-

de-porco, o qual proporcionou maior teor de COT apenas quando comparado à vegetação espontânea (Tabela 4). Na camada de 5-10 cm de profundidade, todas as plantas de cobertura, com exceção da crotalária-júncea, levaram a incrementos nos teores de COT, quando comparadas à vegetação espontânea (Tabela 4).

Ao comparar os tratamentos com cultivo de mucuna-cinza e de feijão-de-porco, em relação à vegetação espontânea, observa-se aumento no teor de COT de, respectivamente, 3,6 e 2,5 g kg⁻¹ na camada de 0-5 cm de profundidade. Em avaliação de espécies de planta de cobertura (guandu-anão, mucuna-cinza, feijão-de-porco e soja-preta) em consórcio com milho, Albuquerque et al. (2005) também verificaram que a mucuna-cinza resultou nas maiores médias de COT, ficando, inclusive, à frente do feijão-de-porco.

O milheto, apesar de contribuir com praticamente o dobro de entrada de resíduos vegetais em relação à média de produção de matéria seca das leguminosas (Tabela 3), não foi a espécie que proporcionou maior teor de COT na camada de 0-5 cm de profundidade, confirmando os resultados obtidos por Mandarino (2020), em avaliações na mesma área do presente trabalho, dezessete anos após o início do experimento.

Na safra 2016/2017, em avaliação de matéria seca das plantas de cobertura na mesma área do experimento, Bettiol (2018) obteve 2,1, 3,6, 6,1 e 11,4 t ha⁻¹ para vegetação espontânea, mucuna-cinza, feijão-de-porco e milheto, respectivamente. Em avaliações anteriores, o padrão de produção de matéria seca foi semelhante, com o tratamento milheto sempre maior (Marayuma, 2017). Desse modo, comparando os dados de produção das espécies mucuna-cinza, feijão-de-porco e milheto, observa-se que o acúmulo de carbono do solo não está diretamente associado à quantidade de restos vegetais e, nesse contexto, a qualidade precisa ser considerada.

Um dos atributos de qualidade do resíduo é a concentração de N, mas é preciso também considerar a quantidade de N e a origem (solo, adubo ou fixação biológica). Com base nos dados de produção de matéria seca e de concentração de N (Tabela 3), pode-se calcular o aporte de N de cada planta de cobertura, sendo de 105, 80, 95, 129 e 54 kg ha⁻¹ de N para milheto, mucuna-cinza, crotalária-júncea, feijão-de-porco e vegetação espontânea, respectivamente. No presente trabalho, a

produção de matéria seca de todas as espécies foi baixa, por causa da escassez de chuvas (Figura 2, Tabela 3) e, conseqüentemente, o aporte de N também foi menor. Na safra 2016/2017, na mesma área experimental, o aporte foi de 103, 119, 195 e 43 kg ha⁻¹ de N para milho, mucuna-cinza, feijão-de-porco e vegetação espontânea, respectivamente (Bettiol, 2018). Os valores numéricos entre as espécies cultivadas são semelhantes, mas nas áreas de milho é N reciclado do solo e nas leguminosas, a maior parte, é N fixado, ou seja, é uma entrada anual diferenciada.

A entrada de N acumulada em 20 anos, em cada sucessão, ajuda a explicar o acúmulo de C no solo. Nas sucessões com mucuna-cinza/milho e feijão-de-porco/milho houve maior acúmulo de C na camada superficial do solo do que na sucessão milho/milho, indicando a diferença na sucessão leguminosa/gramínea e gramínea/gramínea, e sugerindo que a formação de MO no sistema gramínea/gramínea está sendo limitada pela menor entrada de N. A importância do N para formação da matéria orgânica do solo já foi solidamente demonstrada em trabalhos anteriores (Boddey et al., 2010; Raphael et al., 2016), sobremaneira do N de liberação lenta, presente nos restos culturais de leguminosas, uma vez que entradas equivalentes de N-fertilizante foram menos eficientes para a formação de MOS (Drinkwater et al., 1998).

Além da contribuição da parte aérea das plantas de cobertura é preciso considerar o efeito das raízes que, ao liberarem diferentes compostos orgânicos na rizosfera, facilitam a proliferação e a atividade dos microrganismos (Di Rauso Simeone et al., 2020), influenciando, dessa forma, os processos de formação da MOS. Os exsudatos liberados pelas raízes são diversos e complexos, com mais de 200 compostos de carbono que podem variar em função da espécie vegetal e das condições fisiológicas (Kumar et al., 2006). A presença de diferentes sistemas radiculares (leguminosas e gramíneas) das plantas de cobertura e do milho pode aumentar os teores de COT através dos exsudatos radiculares e da biomassa microbiana do solo.

Nas camadas de 0-5 cm e 5-10 cm, embora haja diferenças estatísticas entre as médias de COT (Tabela 4), as amplitudes entre os valores são pequenas e são atribuídas ao método de determinação de C do solo utilizado (incineração por via

seca), no qual todas as formas de C presentes nas amostras são medidas. Na camada de 0-5 cm de profundidade, o maior teor de COT observado aos 7 DAD, em relação aos 97 DAD, está associado, provavelmente, à maior quantidade de resíduos vegetais ainda em estágio inicial de decomposição, que foi, na amostra, contabilizado como COT.

Os teores de nitrogênio total (NT) nas camadas de 0-5 cm e 5-10 cm variaram em função do cultivo de plantas de cobertura e da época de coleta de solo (Tabela 4). Na camada de 0-5 cm, o maior valor de NT foi observado com cultivo de mucuna-cinza e, na camada de 5-10 cm de profundidade, a mucuna-cinza apresentou maior teor de NT apenas em relação à vegetação espontânea (Tabela 4). Com base nos aumentos de COT registrados com cultivo de mucuna-cinza em ambas as camadas de solo, os resultados obtidos eram esperados, considerando que à medida que o COT acumula, há aumento nos teores totais de N, visto que de 3,70 a 4,15% da MOS são representados pelo nitrogênio (Meurer, 2012).

A relação C/N do solo variou em função do cultivo de plantas de cobertura nas camadas de 0-5 cm e 5-10 cm de profundidade (Tabela 4). Na camada superficial do solo (0-5 cm), a menor relação C/N do solo foi observada com o cultivo de mucuna-cinza (Tabela 4), espécie que, para essa mesma camada, foi a de maior contribuição para o NT, resultando, conseqüentemente, na menor relação C/N do solo. Houve também influência da época de coleta de solo na relação C/N em todas as camadas (Tabela 4). Observou-se que a menor relação C/N do solo ocorreu na última época de coleta de solo, realizada aos 97 DAD, indicando que formas de carbono mais instáveis foram degradadas e perdidas na forma de CO₂ e o N foi imobilizado.

Embora comparações estatísticas entre as profundidades não tenham sido feitas, observou-se tendência de diminuição dos teores de COT e de NT com o aumento da profundidade. Em áreas de semeadura direta, o acúmulo de C e de N ocorre nos primeiros centímetros do solo devido, principalmente, à manutenção dos resíduos vegetais sobre a superfície e ao revolvimento mínimo do solo.

4.2 C e N da biomassa microbiana do solo

O carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS) apresentou diferenças significativas devido ao cultivo de plantas de cobertura nas camadas de 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm de profundidade, mas não houve efeito de época de coleta de solo ou de interações (Tabela 5).

Tabela 5. Carbono da biomassa microbiana do solo (C-BMS), nitrogênio da biomassa microbiana do solo (N-BMS) e relação C/N da BMS em função do cultivo de plantas de cobertura (PC) e da época de coleta de solo (E).

PC	C-BMS (mg kg ⁻¹)			N-BMS (mg kg ⁻¹)			C/N da BMS		
	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
MI	165,0 ab	122,7 ab	111,7 abc	12,2	10,2	8,5 ab	15,4	12,6	14,2
MC	190,4 a	137,9 a	127,0 a	15,3	12,9	9,5 ab	14,5	14,4	14,5
CJ	149,3 ab	108,9 bc	119,8 ab	16,4	10,5	11,9 a	9,6	11,1	11,6
FP	161,5 ab	117,4 abc	103,2 bc	13,6	11,7	10,4 ab	12,4	10,7	10,8
VE	111,8 b	95,2 c	94,6 c	10,4	7,7	6,5 b	13,2	15,0	19,4
E									
7	162,76	107,9	109,0	12,4 b	9,8	8,8	15,4 a	12,0 b	14,2
52	152,27	118,6	118,3	17,0 a	12,0	10,4	9,4 b	10,3 b	13,0
97	151,75	122,7	108,3	11,4 b	10,0	8,9	14,1 a	15,9 a	15,1
Teste F									
PC	3,28*	9,07**	6,29**	2,06 ^{NS}	2,15 ^{NS}	4,27*	2,72 ^{NS}	1,25 ^{NS}	2,44 ^{NS}
E	0,88 ^{NS}	2,08 ^{NS}	2,19 ^{NS}	9,42**	2,86 ^{NS}	1,55 ^{NS}	13,09**	9,99**	0,47 ^{NS}
PC x E	2,92 ^{NS}	1,03 ^{NS}	1,61 ^{NS}	0,51 ^{NS}	1,97 ^{NS}	0,51 ^{NS}	1,83 ^{NS}	3,67*	0,75 ^{NS}

*, * e ^{NS}: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste F, respectivamente. Médias seguidas de letras iguais na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. MI: milho, MC: mucuna-cinza, CJ: crotalaria-júncea, FP: feijão-de-porco e VE: vegetação espontânea.

Tendo como referência a vegetação espontânea, somente alguns tratamentos em cada camada aumentaram os teores de C-BMS (Tabela 5). Na camada de 0-5 cm de profundidade, o cultivo de mucuna-cinza proporcionou aumento de 70% quando comparado com o tratamento controle (vegetação espontânea). Nas demais camadas, milho e mucuna-cinza, na profundidade de 5-10 cm, e mucuna-cinza e crotalaria-júncea, na profundidade de 10-20 cm, apresentaram aumentos significativos do carbono microbiano em relação à vegetação espontânea.

A mucuna-cinza, no conjunto das espécies avaliadas, foi a que apresentou comportamento constante nas três profundidades. Os resíduos vegetais provenientes da parte aérea dessa leguminosa são caracterizados pela elevada concentração de N e baixa relação C/N (Tabela 3), implicando em taxas de

decomposição mais rápidas por serem fontes mais lábeis de nutrientes e energia para o crescimento microbiano (Balota et al., 2003). Em estudos de Conceição et al. (2005), a mucuna-cinza representou 77,6% do C microbiano avaliado no tratamento referência (campo natural).

Morfologicamente, a mucuna-cinza também difere das demais espécies, induzindo reflexos diferentes na BMS. A alta proporção de folhas da mucuna-cinza (42%), em comparação com 72%, 32% e 19% do feijão-de-porco, milho e crotalária-júncea, respectivamente (Tiecher et al., 2016), garante fontes mais facilmente disponíveis para os microrganismos do solo, uma vez que, de modo geral, as folhas são consideradas mais lábeis do que os demais órgãos vegetais. Era esperado, dessa forma, um efeito diferenciado para o feijão-de-porco em relação à BMS, já que é a espécie que apresenta a maior proporção de folhas (72%). Entretanto, houve alta infestação de vaquinhas (*Diabrotica speciosa*) durante o período de estabelecimento do feijão-de-porco no campo, comprometendo a área foliar. Os danos, mesmo sendo realizado controle químico, parecem ter reduzido o desempenho esperado para essa espécie.

Ao medir a BMS em solo incubado com resíduos separados do trigo (folha, caule e raiz) e marcados com ^{13}C , Shahbaz et al. (2017) relataram que a quantidade de C derivado do resíduo presente como C-BMS foi maior com as adições de folhas (0,07 – 0,37 g C kg⁻¹ solo) do que com as de raízes (0,02 – 0,17 g C kg⁻¹ solo). Os resultados confirmam que o C da raiz é relativamente menos lábil e sua decomposição é mais lenta (Cotrufo et al., 2013; Stewart et al., 2015).

Carneiro et al. (2008) não constataram incrementos no C-BMS, em relação à vegetação espontânea (pousio), quando as espécies nabo-forrageiro, milho e crotalária-espectabilis foram cultivadas. Por outro lado, feijão-de-porco, crotalária-júncea, níger e aveia proporcionaram aumentos no teor de C-BMS de 190, 125, 107 e 93%, respectivamente, em relação à área em pousio. Os autores justificaram os resultados com base na qualidade dos resíduos vegetais, com vantagem para os de relação C/N menor, que apresentaram maior proporção de folhas em relação à de ramos.

O nitrogênio da biomassa microbiana do solo (N-BMS) foi influenciado pelo cultivo de plantas de cobertura em 10-20 cm de profundidade (Tabela 5). As

espécies cultivadas de plantas de cobertura (milheto, mucuna-cinza, crotalária-júncea e feijão-de-porco) não diferiram entre si e a única espécie que diferiu da vegetação espontânea foi a crotalária-júncea, a qual resultou em acréscimo de 83% no N-BMS em relação ao tratamento controle (vegetação espontânea).

Ao decomporem os resíduos vegetais, os microrganismos necessitam de N. Caso o resíduo vegetal não forneça todo o N requerido, os microrganismos utilizarão o N mineral do solo, imobilizando-o em suas células. Consequentemente, independentemente da relação C/N ou da qualidade do resíduo, haverá aumento da concentração de N-BMS nos estágios iniciais de decomposição (Sakala et al., 2000; Bird et al., 2001).

A imobilização microbiana, entretanto, é temporária, pois à medida que ocorre a morte celular, há mineralização dos nutrientes previamente imobilizados na biomassa microbiana (Perez et al., 2005), representando, portanto, uma fonte lábil de nutrientes às culturas (Gama-Rodrigues et al., 2005).

Observou-se influência da época de coleta de solo no N-BMS apenas na camada de 0-5 cm de profundidade (Tabela 5). Aos 52 dias após a dessecação (DAD) das plantas de cobertura houve aumento de 37% no teor de N-BMS em relação à primeira coleta de solo (7 DAD). O maior N-BMS nessa época, na camada mais superficial, pode estar relacionado à adubação nitrogenada de cobertura do milho, realizada 17 dias antes da segunda coleta de solo (52 DAD), com a qual a limitação dos microrganismos por esse nutriente pode ter sido aliviada.

Em comparação às espécies vegetais, o enriquecimento de N com adubos industriais pode alterar as comunidades microbianas do solo mais rapidamente (Bradley et al., 2006; Zhang et al., 2008). Fisk e Schmidt (1996) relataram que a adição de fertilizante nitrogenado aumentou o N-BMS, indicando que os microrganismos do solo foram importantes drenos de N disponível em curto prazo. A imobilização do N aplicado na forma de fertilizante pela BMS é uma das maneiras de conservá-lo e retê-lo na forma orgânica por mais tempo (Jenkinson e Ladd, 1981).

Houve efeito da época de coleta de solo na relação C/N da BMS na camada de 0-5 cm de profundidade (Tabela 5). A menor relação C/N da BMS foi observada aos 52 DAD, sugerindo uma maior proporção de bactérias do que de fungos em função da adubação nitrogenada de cobertura do milho.

Kirchmann et al. (2013) relataram biomassa fúngica menor devido ao aumento de bactérias nitrificantes após a adição de fertilizante nitrogenado. Além disso, em comparação com os fungos, as bactérias têm maiores demandas de N (Zechmeister-Boltenstern et al., 2016), o que pode diminuir a proporção de fungos para bactérias após o enriquecimento com N (Jia et al., 2020) e, portanto, levar a uma redução da relação C/N da BMS.

Na camada de 5-10 cm de profundidade houve interação entre plantas de cobertura e época de coleta de solo na relação C/N da BMS (Tabela 5), e o desdobramento da interação é apresentado na Tabela 6.

Observa-se que as plantas de cobertura não diferiram entre si, porém, há diferenças na relação C/N da BMS quanto à época de coleta de solo para as espécies mucuna-cinza e vegetação espontânea (Tabela 6).

Tabela 6. Desdobramento da interação entre plantas de cobertura e época de coleta de solo para relação C/N da BMS na camada 5-10 cm de profundidade.

Época	MI	MC	CJ	FP	VE
	C/N da BMS				
7	12,65 Aa	13,26 Ab	10,16 Aa	11,90 Aa	12,15 Ab
52	11,48 Aa	6,06 Ab	11,42 Aa	9,60 Aa	12,91 Aab
97	13,56 Aa	23,98 Aa	11,64 Aa	10,53 Aa	19,91 Aa

Médias com letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. MI: milheto, MC: mucuna-cinza, CJ: crotalária-júncea, FP: feijão-deporco e VE: vegetação espontânea.

Na mucuna-cinza, a maior relação C/N da BMS ocorreu aos 97 DAD e, na vegetação espontânea, observou-se que a relação C/N da BMS nas coletas realizadas aos 7 e 52 DAD foi menor do que aos 97 DAD (Tabela 6). Em ambas as situações, a menor relação C/N da BMS aos 7 DAD, em relação aos 97 DAD, indica uma possível predominância de bactérias, em relação aos fungos, no período inicial de decomposição. O inverso, ou seja, a maior relação C/N da BMS aos 97 DAD, em relação aos 7 DAD, pode evidenciar aumento na proporção de fungos. As bactérias alimentam-se de fontes mais lábeis, enquanto que os fungos são mais especializados na decomposição de resíduos mais lignificados (Bossuyt et al., 2001; Millar et al., 2004; Kramer et al., 2012), indicando a presença de material mais lábil no início do processo de decomposição e de material mais recalcitrante no final do processo.

O quociente microbiano (C-BMS/COT) foi influenciado pelo cultivo de plantas de cobertura a 5-10 cm de profundidade (Tabela 7).

Em comparação à vegetação espontânea, o incremento na proporção C-BMS/COT em 5-10 cm de profundidade foi de 23% quando a mucuna-cinza foi a espécie cultivada, indicando maior conversão de C orgânico em C microbiano a partir dessa leguminosa (Tabela 7). Em situações de estresse, a capacidade de utilização do C pela biomassa microbiana é diminuída e, conseqüentemente, o quociente microbiano também é menor (Anderson e Domsch, 1993). Com base na tendência de aumento nos valores de C-BMS/COT e de C-BMS com cultivo de mucuna-cinza em relação ao pousio, pode-se afirmar que essa leguminosa contribuiu para aumento de qualidade do solo.

Tabela 7. Razão carbono da biomassa microbiana do solo e carbono orgânico total (C-BMS/COT) e nitrogênio da biomassa microbiana do solo e nitrogênio total (N-BMS/NT) em função do cultivo de plantas de cobertura (PC) e da época de coleta de solo (E).

PC	C-BMS/COT (%)			N-BMS/NT (%)		
	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
MI	1,04	0,99 ab	0,98	1,22	1,34	1,22
MC	1,08	1,10 a	1,11	1,24	1,50	1,40
CJ	1,00	0,89 ab	1,10	1,61	1,33	1,91
FP	1,06	0,94 ab	0,89	1,32	1,48	1,44
VE	0,88	0,89 b	0,95	1,33	1,15	1,19
E						
7	0,99	0,84 b	0,99 ab	1,21 b	1,25 b	1,43
52	1,04	1,02 a	1,09 a	1,73 a	1,65 a	1,67
97	1,02	1,02 a	0,94 b	1,09 b	1,19 b	1,20
Teste F						
PC	1,55 ^{NS}	3,59*	2,78 ^{NS}	1,24 ^{NS}	1,30 ^{NS}	1,65 ^{NS}
E	0,29 ^{NS}	5,9*	4,78*	13,78*	7,32*	3,51 ^{NS}
PC x E	1,22 ^{NS}	1,03 ^{NS}	1,66 ^{NS}	0,35 ^{NS}	1,78 ^{NS}	0,55 ^{NS}

*, * e ^{NS}: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste F, respectivamente. Médias seguidas de letras iguais na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. MI: milheto, MC: mucuna-cinza, CJ: crotalaria-júncea, FP: feijão-de-porco e VE: vegetação espontânea.

Nas camadas 5-10 e 10-20 cm de profundidade, houve influência da época de coleta de solo no quociente microbiano (Tabela 7). Para a razão N-BMS/NT, houve influência apenas da época de coleta de solo nas camadas 0-5 cm e 5-10 cm de profundidade (Tabela 7). Observa-se que a maior razão, tanto para o C-BMS/COT quanto para o N-BMS/NT, foi aos 52 DAD das plantas de cobertura. A justificativa

nesse caso segue a mesma lógica daquela apresentada para a influência da época de coleta no teor de N-BMS, em que a adubação nitrogenada pode ter favorecido a imobilização de C e N pela microbiota do solo.

4.3 Fracionamento físico do C e do N orgânico

O COP e o NOP foram influenciados pelo cultivo de plantas de cobertura na camada superficial (Tabela 8). No tratamento com mucuna-cinza observam-se ganhos de 40% e 86% no COP em relação aos tratamentos milho e controle (vegetação espontânea), respectivamente. Quanto ao NOP, a mucuna-cinza diferiu de milho, crotalária-júncea e vegetação espontânea, proporcionando ganhos de 50%, 50% e 88%, respectivamente. Em estudo de Conceição et al. (2005), o sistema mucuna/milho promoveu incremento nos valores de COP e NOP de, respectivamente, 70,4% e 114 % em relação ao campo natural, na camada de 0-5 cm de profundidade.

Tabela 8. Carbono orgânico particulado (COP), nitrogênio orgânico particulado (NOP) e relação C/N particulada em função do cultivo de plantas de cobertura (PC) e da época de coleta de solo (E).

PC	COP (g kg ⁻¹)			NOP (g kg ⁻¹)			C/N particulada		
	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
MI	1,53 bc	0,78 a	0,77	0,10 bc	0,05	0,04 ab	15,85 b	19,24	18,46
MC	2,14 a	0,97 a	0,85	0,15 a	0,06	0,05 ab	15,43 b	20,37	17,65
CJ	1,71 ab	0,79 a	0,78	0,10 bc	0,05	0,04 b	20,43 a	18,32	21,26
FP	1,83 ab	0,96 a	0,87	0,12 ab	0,06	0,06 a	16,94 ab	17,75	16,59
VE	1,15 c	0,65 b	0,72	0,08 c	0,04	0,04 b	16,63 ab	18,36	18,81
E									
7	1,81	0,86	0,72 b	0,10	0,04	0,04 c	19,36 a	20,82 a	22,42 a
52	1,57	0,79	0,81 a	0,13	0,06	0,05 b	13,46 b	13,84 b	17,78 b
97	1,65	0,84	0,87 a	0,10	0,05	0,06 a	18,36 a	18,76 ab	15,47 b
Teste F									
PC	11,57**	12,77**	2,27 ^{NS}	11,27**	2,42 ^{NS}	4,83*	4,13*	0,36 ^{NS}	1,57 ^{NS}
E	2,17 ^{NS}	0,39 ^{NS}	8,85**	2,23 ^{NS}	3,67 ^{NS}	18,87**	6,40*	7,46*	9,76*
PC x E	1,82 ^{NS}	1,21 ^{NS}	0,38 ^{NS}	0,67 ^{NS}	0,65 ^{NS}	0,91 ^{NS}	0,45 ^{NS}	1,05 ^{NS}	2,29 ^{NS}

*, * e ^{NS}: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste F, respectivamente. Médias seguidas de letras iguais na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. MI: milho, MC: mucuna-cinza, CJ: crotalária-júncea, FP: feijão-de-porco e VE: vegetação espontânea.

A presença de resíduos vegetais, particularmente de tecidos radiculares provenientes da mucuna-cinza, pode ter levado ao aumento nos valores de COP e

NOp observados quando essa leguminosa foi cultivada. Em avaliação anterior, no mesmo experimento, a mucuna-cinza apresentou a maior porcentagem de lignina nos tecidos da raiz, com valor de 25%, em comparação com 19%, 15% e 15%, do feijão-de-porco, pousio e milheto, respectivamente (Maruyama, 2017). O teor de lignina na crotalária-júncea foi de 18% (Weiler, 2012). A taxa de decomposição dos resíduos está, de modo geral, negativamente relacionada com a quantidade de moléculas recalcitrantes, como a lignina (Castellano et al., 2015).

A importância do C radicular para aumento dos teores de COp já foi relatada por Lian et al. (2016). Dessa forma, o tempo de permanência dos resíduos radiculares provenientes da mucuna-cinza é maior, favorecendo, assim, o aumento nos valores de COp e NOp, uma vez que a matéria orgânica particulada é constituída principalmente de resíduos vegetais parcialmente decompostos (Cambardella e Elliott, 1992).

É possível inferir pelos resultados observados nos valores de COp e NOp das camadas superficiais que o fracionamento da matéria orgânica é uma alternativa para diferenciar as áreas avaliadas de acordo com a espécie escolhida como planta de cobertura, pois o tratamento com mucuna-cinza, em comparação ao milheto, elevou os teores das frações particuladas.

Na camada subsuperficial (5-10 cm), apenas o tratamento com vegetação espontânea diferiu dos demais tratamentos, apresentando o menor valor de COp (Tabela 8).

Houve efeito de plantas de cobertura na relação C/N particulada apenas na camada de 0-5 cm de profundidade (Tabela 8). Os valores médios variaram de 15,85 a 20,83 e são próximos da média (22,1) relatada por Cotrufo et al. (2019), em meta-análise para um subconjunto de solos (n=186). Relações mais amplas sugerem que a matéria orgânica particulada seja derivada principalmente dos resíduos vegetais, mas com considerável degradação microbiana e imobilização de N em relação aos resíduos vegetais frescos (Six et al., 2001).

É interessante destacar que não houve diferença na relação C/N do solo entre os tratamentos com cultivo de milheto e crotalária-júncea na camada de 0-5 cm de profundidade (Tabela 4). Entretanto, a relação C/N particulada do solo cultivado com crotalária-júncea diferiu daquela com milheto e mucuna-cinza, mas foi semelhante

ao feijão-de-porco e à vegetação espontânea (Tabela 8). Essa diferença pode ser justificada pelo tipo de resíduo que entra no solo. Considerando que a razão lignina/N é um dos principais determinantes do processo de decomposição (Kachaka et al., 1993), pode-se inferir que os resíduos vegetais da parte aérea da crotalária-júncea, por apresentarem a maior proporção lignina/N (5, Tabela 3), serão decompostos mais lentamente do que os resíduos do milho e da mucuna-cinza, justificando a maior relação C/N particulada apresentada no tratamento com crotalária-júncea. Esses resultados reforçam a importância do fracionamento da matéria orgânica para melhor compreensão das mudanças provocadas pelos diferentes manejos na qualidade do solo.

Houve influência da época de coleta do solo no COp e no NOp apenas na camada de 10-20 cm de profundidade (Tabela 8). O aumento nos valores de COp e de NOp observados nas coletas de solo mais tardias (52 e 97 DAD das plantas de cobertura) está associado à adubação nitrogenada que antecedeu à segunda amostragem de solo. Plaza-Bonilla et al. (2014), em experimento de longa duração com cultivo de plantas de cobertura e fertilização nitrogenada, relataram aumento de 21% no COp após aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N, sendo, inclusive, considerada a fração de maior sensibilidade ao manejo da adubação nitrogenada nas três profundidades avaliadas pelos autores (0-5, 5-20 e 20-40 cm).

O resultado dos efeitos do cultivo de plantas de cobertura e da época de coleta de solo nos valores de C e N associados aos minerais (COam) é apresentado na Tabela 9.

O cultivo de plantas de cobertura favoreceu o acúmulo de COam em relação a vegetação espontânea, tanto em superfície (0-5 cm) quanto em subsuperfície (5-10 cm) (Tabela 9). Os resultados demonstram a importância do aporte anual de C pelas plantas de cobertura cultivadas (milho, mucuna-cinza, crotalária-júncea e feijão-de-porco) para que essa fração mais recalcitrante seja formada e permaneça no solo.

O revolvimento mínimo dos solos sob semeadura direta, além disso, preserva a estrutura dos agregados do solo e, conseqüentemente, favorece a proteção física do COp (Tivet et al., 2013), o qual, posteriormente, será estabilizado em COam.

Dessa forma, a maior duração da semeadura direta, eleva o potencial de armazenamento de C no solo nas formas mais estáveis (Ferreira et al., 2020).

Tabela 9. Carbono orgânico associado aos minerais (COam) e nitrogênio orgânico associado aos minerais (NOam) em função do cultivo de plantas de cobertura (PC) e da época de coleta de solo (E).

PC	COam (g kg ⁻¹)			NOam (g kg ⁻¹)		
	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
MI	13,44 a	11,74 a	10,85	0,90 b	0,72 ab	0,69
MC	14,26 a	11,65 a	10,59	1,11 a	0,83 a	0,64
CJ	13,21 a	11,52 a	10,18	0,91 b	0,74 ab	0,59
FP	13,47 a	11,52 a	10,84	0,91 b	0,73 ab	0,66
VE	11,66 b	10,33 b	9,64	0,73 c	0,65 b	0,58
E						
7	13,80	11,96 a	10,39	0,92	0,75 ab	0,60 b
52	13,12	10,89 b	10,15	0,86	0,68 b	0,61 b
97	12,71	11,21 ab	10,71	0,97	0,78 a	0,69 a
Teste F						
PC	11,35**	6,98**	2,66 ^{NS}	16,78**	4,99*	1,55 ^{NS}
E	3,96 ^{NS}	7,18*	2,87 ^{NS}	3,82 ^{NS}	6,34*	8,33*
PC x E	0,89 ^{NS}	0,76 ^{NS}	1,23 ^{NS}	1,40 ^{NS}	1,90 ^{NS}	0,91 ^{NS}

*, e ^{NS}: significativo a 1%, 5% e não significativo pelo teste F, respectivamente. Médias seguidas de letras iguais na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. MI: milheto, MC: mucuna-cinza, CJ: crotalária-júncea, FP: feijão-de-porco e VE: vegetação espontânea.

Com base nos resultados apresentados de COT, COp e COam, observa-se que os valores de COam são numericamente maiores do que os valores de COp, indicando a importância desta fração para a manutenção ou aumento dos teores de COT. Duval et al. (2016) constataram, em todos os tratamentos com plantas de cobertura (trigo, aveia, aveia+ervilhaca e ervilhaca), que o COam foi responsável por mais de 70% do COT.

Para o NOam, na camada de 0-5 cm de profundidade, o maior valor ocorreu com cultivo de mucuna-cinza (Tabela 9). Em 5-10 cm de profundidade, não houve diferença para o teor de NOam entre as plantas de cobertura cultivadas, porém a mucuna-cinza proporcionou ganho no valor de NOam de 28% quando comparada com o controle (vegetação espontânea) (Tabela 9). Isso indica a importância dessa leguminosa na formação de materiais mais recalcitrantes que acumulam no solo, e corrobora com o alto teor de nitrogênio total observado com cultivo de mucuna-cinza (Tabela 4).

Em avaliação dos efeitos do cultivo de diferentes plantas de cobertura nos atributos físicos e químicos do solo, Giumbelli (2018) atribuiu a maior quantidade de

NOam ao fornecimento de N pela decomposição dos resíduos vegetais, principalmente da mucuna-cinza. Segundo o autor, a baixa relação C/N facilitou a transformação do material vegetal da mucuna-cinza em partículas com maior afinidade pelos minerais de menor tamanho do solo (silte e argila).

De acordo com Cotrufo et al. (2013), o acúmulo mais rápido e eficiente da matéria orgânica associada aos minerais (MOam) ocorre com a adição de resíduos vegetais de alta qualidade, caracterizados pelas concentrações de N > 2,5%, lignina < 15% e polifenóis < 4% (Palm et al., 2001). Considerando os teores de N e de lignina das espécies avaliadas (Tabela 3), os resíduos de mucuna-cinza e de feijão-de-porco são classificados como de “alta qualidade”, de acordo com Palm et al. (2001).

Sugere-se que os resíduos de alta qualidade beneficiem a biomassa microbiana do solo, a taxa de crescimento e a eficiência do uso de C microbiano (Brown et al., 2004 ; Xu et al., 2013). Considerando que a maior parte da matéria orgânica associada aos minerais (MOam) é composta por resíduos microbianos e não por resíduos vegetais (Sollins et al., 2009; Miltner et al., 2012), é esperado que os resíduos de alta qualidade promovam maior acréscimo na MOam do que os resíduos de baixa qualidade.

Em estudo de Córdova et al. (2018), a alfafa, caracterizada pelos autores como sendo de alta qualidade (C: 418 g kg⁻¹; N: 25,3 g kg⁻¹; lignina: 15,8% e relação C/N: 16,5) foi o resíduo vegetal que promoveu maior acúmulo de COam e de NOam em solo franco-limoso. Os autores atribuíram esse maior acúmulo de MOam às rápidas taxas de decomposição dos resíduos vegetais da alfafa.

5. CONCLUSÕES

O cultivo de plantas de cobertura promoveu, após 20 anos, aumento de qualidade do solo, sendo essa prática indicada para garantia da preservação dos recursos naturais.

As sucessões mucuna-cinza/milho e feijão-de-porco/milho, em relação ao tratamento pousio na pré-safra, aumentaram os teores de C na camada superficial do solo (0-5 cm de profundidade).

Em relação à vegetação-espontânea, a sucessão mucuna-cinza/milho aumentou os teores de carbono da biomassa microbiana do solo, carbono orgânico particulado, nitrogênio orgânico particulado e nitrogênio orgânico associado aos minerais, na camada de 0-5 cm de profundidade, o que está associado com as características químicas do resíduo dessa leguminosa, caracterizada pela alta concentração de N e de lignina.

6. REFERÊNCIAS

Albuquerque JA, Argenton J, Bayer C, Wildner LDP, Kuntze MAG (2005) Relationship of soil attributes with aggregate stability of a hapludox under distinct tillage systems and summer cover crops. **Revista Brasileira de Ciência do solo** 29(3):415-424.

Amado TJC, Bayer C, Eltz FLF, Brum ACR (2001) Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25:189-197.

Anderson JPE, Domsch KH (1993) The metabolic quotient (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry** 25:393-395.

Andrioli I, Centurion JF (1999) Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. **Resumos...** Brasília: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. CD-ROM.

Balota EL, Calegari A, Nakatani, AS, Coyne MS (2014) Benefits of winter cover crops and no-tillage for microbial parameters in a Brazilian Oxisol: A long-term study. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 197:31-40.

Balota EL, Colozzi-Filho A, Andrade DS, Dick RP (2003) Microbial biomass in soils under different tillage and crop rotation systems. **Biology and Fertility of Soils** 38: 15-20.

Bayer C, Dieckow J, Amado TJC, Eltz FLF, Vieira FCB (2009) Cover crop effects increasing carbon storage in a subtropical no-till sandy Acrisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 40:1499-1511.

Bayer C, Martin-Neto L, Mielniczuk J, Pavinato A (2004) Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 39:677-683.

Beare MH, Mcneill SJ, Curtin D, Parfitt RL, Jones HS, Dodd MB, Sharp J (2014) Estimating the organic carbon stabilisation capacity and saturation deficit of soils: a New Zealand case study. **Biogeochemistry** 120:71-87.

Bending GD, Turner MK, Jones JE (2002) Interactions between crop residue and soil organic matter quality and the functional diversity of soil microbial communities. **Soil Biology and Biochemistry** 34:1073-1082.

Bettiol ACT (2018) **Avaliação do nitrogênio orgânico mineralizável em solo cultivado com milho em sucessão a plantas de cobertura**. 52 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Unesp, Jaboticabal.

Bird JA, Horwath WR, Eagle AJ, van Kessel C (2001) Immobilization of fertilizer nitrogen in rice: effects of straw management practices. **Soil Science Society of America Journal** 65:1143-1152.

Boddey RM, Jantalia CP, Conceição PC, Zanatta JA, Bayer C, Mielniczuk J, Dieckow J, Santos HP, Denardin JE, Aita C, Giacomini SJ, Alves BJR, Urquiaga S (2010) Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero till subtropical agriculture. **Global Change Biology** 16:784-795.

Bossuyt H, Denef K, Six J, Frey S, Merckx R, Paustian K (2001) Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. **Applied Soil Ecology** 16:195-208.

Bradley K, Drijber RA, Knops J (2006) Increased N availability in grassland soils modifies their microbial communities and decreases the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil Biology and Biochemistry** 38:1583-1595

Brookes PC, Landman A, Pruden G, Jenkinson DS (1985) Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. **Soil Biology and Biochemistry** 17:837-842.

Brown J, Gilloly F, Allen A, Savage V, West G (2004) Toward a metabolic theory of ecology. **Ecology** 85:1771-1789.

Bu R, Lu J, Ren T, Liu B, Li X, Cong R (2015) Particulate organic matter affects soil nitrogen mineralization under two crop rotation systems. **PLoS One** 10(12):e0143835.

Bünemann EK, Bongiorno G, Bai Z, Creamer RE, Dedeyn G, Goede R, Flesskens L, Geissen V, Kuyper TW, Mäder P, Pulleman M, Sukkel W, Van Groenigen JW, Brussaard L (2018) Soil Quality - A critical review. **Soil Biology and Biochemistry** 120:105-125.

Camargo OA, Moniz AC, Jorge JA, Valadares JMAS (2009) **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 77p. (Boletim técnico, 106)

Cambardella CA, Elliott ET (1992) Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal** 56:777-783.

Cambardella CA, Gajda AM, Doran JW, Wienhold BJ, Kettler TA (2001) Estimation of particulate and total organic matter by weight loss-on-ignition. In.: Lal R, Kimball JM, Follet RF, Stewart BA (Eds.) **Assessment methods for soil carbon**. Boca Raton: CRC Press, p. 349–359.

Campbell CA, Biederbeck VO, Zentner RP, Lafond GP (1991) Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. **Canadian Journal of Soil Science** 71:363-376.

Carmo CAFS, Araújo WS, Bernardi ACC, Saldanha MFC (2000) **Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa solos**. Rio de Janeiro: Embrapa: Solos, 41 p. (Embrapa-Solos. Circular Técnica, 6).

Carneiro MAC, Cordeiro MAS, Assis PCR, Moraes ES, Pereira HS, Paulino HB, Souza ED (2008) Produção de fitomassa de diferentes espécies de cobertura e suas alterações na atividade microbiana de solo de cerrado. **Bragantia** 67:455-462.

Castellano MJ, Mueller KE, Olk DC, Sawyer JE, Six J (2015) Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept. **Global Change Biology** 21:3200-3209.

Chavarria DN, Verdenelli RA, Serri DL, Restovich SB, Andriulo AE, Meriles JM, Vargas-Gil S (2016) Effect of cover crops on microbial community structure and related enzyme activities and macronutrient availability. **European Journal of Agronomy** 76:74-82.

Conceição PC, Amado TJC, Mielniczuk J, Spagnollo E (2005) Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 29:777-788.

Conceição PC, Dieckow J, Bayer C (2013) Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil and Tillage Research** 129:40-47.

Córdova SC, Olk DC, Dietzel RN, Mueller KE, Archontoulis SV, Castellano MJ (2018) Plant litter quality affects the accumulation rate, composition, and stability of mineral-associated soil organic matter. **Soil Biology and Biochemistry** 125:115-124.

Cotrufo MF, Ranalli MG, Haddix ML, Six J, Lugato E (2019) Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. **Nature Geoscience** 12:989-994.

Cotrufo MF, Wallenstein MD, Boot CM, Denef K, Paul E (2013) 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** 19:988-995.

Daryanto S, Fu B, Wang L, Jacinthe PA, Zhao W (2018) Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops. **Earth-Science Reviews** 185:357-373.

Di Rauso Simeone G, Müller M, Felgentreu C, Glaser B (2020) Soil microbial biomass and community composition as affected by cover crop diversity in a short-term field experiment on a podzolized Stagnosol-Cambisol. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 183:539-549.

Diekow J, Mielniczuk J, Knicker H, Bayer C, Dick DP, Kögel-Knabner I (2005) Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil and Tillage Research** 81:87-95.

Drinkwater LE, Wagoner P, Sarrantonio M (1998) Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. **Nature** 396:262-265.

Duval ME, Galantini JA, Capurro JE, Martinez JM (2016) Winter cover crops in soybean monoculture: Effects on soil organic carbon and its fractions. **Soil and Tillage Research** 161:95-105.

Duval ME, Galantini JA, Iglesias JO, Canelo S, Martinez JM, Wall L (2013) Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. **Soil and Tillage Research** 131:11-19.

Ensinas SC, Serra AP, Marchetti ME, Silva EF, Prado EAF, Lourente ERP, Altomar PH, Potrich DC, Martinez MA, Conrad VA, Jesus MV, El Kadri TC (2016) Cover crops affect on soil organic matter fractions under no till system. **Australian Journal of Crop Science** 10:503-512.

Faccin FC, Marchetti ME, Serra AP, Ensinas SC (2016) Frações granulométricas da matéria orgânica do solo em consórcio de milho safrinha com capim-marandu sob fontes de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51:2000-2009.

Ferreira CR, da Silva Neto EC, Pereira MG, do Nascimento Guedes J, Rosset JS, dos Anjos LHC (2020) Dynamics of soil aggregation and organic carbon fractions over 23 years of no-till management. **Soil and Tillage Research** 198-104533.

Fisk MC, Schmidt SK (1996) Microbial responses to nitrogen additions in alpine tundra soil. **Soil Biology and Biochemistry** 28:751-755.

Franchini JC, Crispino CC, Souza RA, Torres E, Hungria M (2007) Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research** 92:18-29.

Frazão LA, de Cássia Piccolo M, Feigl BJ, Cerri CC, Cerri CEP (2010) Inorganic nitrogen, microbial biomass and microbial activity of a sandy Brazilian Cerrado soil under different land uses. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 135:161-167.

Gama-Rodrigues EFD, Barros NFD, Gama-Rodrigues ACD, Santos GDA (2005) Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista brasileira de Ciência do Solo** 29:893-901.

Giumbelli LD (2018) **Índices de agregação e atributos químicos do solo sob sistemas de cultivo de cebola em sucessão ou rotação de culturas**. 97f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – UFSC, Florianópolis.

Greenhouse SW, Geisser S (1959) On methods in the analysis of profile data. **Psychometrika** 24:95-112.

Heal OW, Anderson J, Swift M (1997) Plant litter quality and decomposition: an historical overview. In: Candisch G, Giller KE (Ed.) **Driven by nature, plant litter quality and decomposition**. Wallingford: CAB International, 30 p.

Heitkamp F, Raupp J, Ludwig B (2009) Impact fertilizer type and rate on carbono and nitrogen pools in a Sandy Cambisol. **Plant and Soil** 319:259-275.

Islam KR, Weil RR (1998) Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils** 27:408-416.

Jenkinson DS (1998) Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil. In: Wilson JR (Eds.) **Advances in Nitrogen Cycling in Agricultural Ecosystems**. Wallingford: CAB International, p. 368-386.

Jenkinson DS, Brookes PC, Powlson DS (2004) Measuring soil microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry** 36:5-7.

Jenkinson DS, Ladd JN (1981) Microbial biomass in soil, measurement and turn over. In: Paul EA, Ladd JN (Eds.) **Soil Biochemistry**. New York: Marcel Dekker, p. 415-471.

Jia X, Zhong Y, Liu J, Zhu G, Shangguan Z, Yan W (2020) Effects of nitrogen enrichment on soil microbial characteristics: from biomass to enzyme activities. **Geoderma** 366:114256.

Jilling A, Kane D, Williams A, Yannarell AC, Davis A, Jordan NR, Koide RT, Mortensen DA, Smith RG, Snapp SS, Spokas KA, Grandy AS (2020) Rapid and distinct responses of particulate and mineral-associated organic nitrogen to conservation tillage and cover crops. **Geoderma** 359:114001.

Kachaka S, Vanlauwe B, Merckx R (1993) Decomposition and nitrogen mineralization of prunings of different quality. In: Mulongoy K, Merckx R (Eds.) **Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture**. Sayce, UK: Wiley, p. 199-208.

Kaschuk G, Alberton O, Hungria M (2010) Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry** 42:1-13.

Kirchmann H, Schön M, Börjesson G, Hamnér K, Kätterer T (2013) Properties of soils in the Swedish long-term fertility experiments: VII. Changes in topsoil and upper subsoil at Örja and Fors after 50 years of nitrogen fertilization and manure application. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science** 63:25-36.

Kramer S, Marhan S, Ruess L, Armbruster W, Butenschoen O, Haslwimmer H, Kuzyakov Y, Pausch J, Scheunemann N, Schoene J (2012) Carbon flow into microbial and fungal biomass as a basis for the belowground food web of agroecosystems. **Pedobiologia** 55:111-119.

Kumar R, Pandey S, Pandey A (2006) Plant roots and carbon sequestration. **Current Science** 91:885-890.

Lavallee JM, Soong JL, Cotrufo MF (2019) Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology** 26:261-273.

Lian T, Wang G, Yu Z, Li Y, Liu X, Jin J (2016) Carbon input from ^{13}C -labelled soybean residues in particulate organic carbon fractions in a Mollisol. **Biology and Fertility of Soils** 52:331-339.

Mandarino AP (2020) **Atributos químicos de Latossolo Vermelho em função de plantas de cobertura e adubação nitrogenada**. 44 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Unesp, Jaboticabal.

Maruyama FFA (2017) **Agregação e carbono orgânico de um Latossolo cultivado por quatorze anos nos sistemas convencional e plantio direto**. 32 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – UFV, Rio Paranaíba.

Mbuthia LW, Acosta-Martínez V, DeBruyn J, Schaeffer S, Tyler D, Odoi E, Mpheshea M, Walker F, Eash N (2015) Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality. **Soil Biology and Biochemistry** 89:24-34.

McGill WB, Dormaar JE, Reint-Dwyer E (1988) New perspective on soil organic matter quality, quantity and dynamics on the Canadian prairies. In: ANNUAL MEETING OF THE CANADIAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE. **Proceedings...** Calgary: CSSS, Agricultural Institute of Canada, p. 30-38.

Meurer EJ (2012) **Fundamentos de química do solo**. 5 ed. Porto Alegre: Evangraf, 280 p.

Millar N, Ndafa J, Cadisch G, Baggs E (2004) Nitrous oxide emissions following incorporation of improved-fallow residues in the humid tropics. **Global Biogeochemical Cycles** 18.

Miltner A, Bombach P, Schmidt-Brücken B, Kästner M (2012) SOM genesis: microbial biomass as a significant source. **Biogeochemistry** 111:41-55.

Muhammad I, Wang J, Sainju UM, Zhang S, Zhao F, Khan A (2021) Cover cropping enhances soil microbial biomass and affects microbial community structure: A meta analysis. **Geoderma** 381:114696.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (2015) **Transformando nosso mundo**: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Brasil, DF. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/2>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

Palm CA, Gachengo CN, Delve RJ, Cadisch G, Giller KE (2001) Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resource database. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 83:27-42.

Perez KSS, Ramos MLG, McManus C (2005) Nitrogênio da biomassa microbiana em solo cultivado com soja, sob diferentes sistemas de manejo, nos Cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 40:137-144.

Plaza-Bonilla D, Álvaro-Fuentes J, Cantero-Martínez C (2014) Identifying soil organic carbon fractions sensitive to agricultural management practices. **Soil and Tillage Research** 139:19-22.

Poeplau C, Don A (2015) Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – a meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 200:33-41.

Raij BV, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (2001) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 235 p.

Raij BV, Cantarella H (1997) Cereais: milho para grão e silagem. In: Raij BV, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC (Eds.) **Recomendações de calagem e adubação para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, p. 56-59.

Raphael JP, Calonego JC, Milori DMB, Rosolem CA (2016) Soil organic matter in crop rotations under no-till. **Soil and Tillage Research** 155:45-53.

Rocha KF, Kuramae EE, Borges BMF, Leite MFA, Rosolem CA (2020) Microbial N-cycling gene abundance is affected by cover crop specie and development stage in an integrated cropping system. **Archives of Microbiology** 202:2005-2012.

Rodrigues EFG (1999) Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: Santos GA, Camargo FAO (Eds.) **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas Tropicais e Subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, p. 227-243.

Romdhane S, Spor A, Busset H, Falchetto L, Martin J, Bizouard F, Bru D, Breuil MC, Philippot L, Cordeau S (2019) Cover crop management practices rather than composition of cover crop mixtures affect bacterial communities in no-till agroecosystems. **Frontiers in Microbiology** 10:1618.

Rosner B (1983) Percentage Points for a Generalized ESD Many-Outlier Procedure. **Technometrics** 25:165-172.

Rovira P, Jorba M, Romanyà J (2010) Active and passive organic matter fractions in Mediterranean forest soils. **Biology and Fertility of Soils** 46(4):355-369.

Sakala WD, Cadisch G, Giller KE (2000) Interactions between residues of maize and pigeonpea and mineral N fertilizers during decomposition and N mineralization. **Soil Biology and Biochemistry** 32:679-688.

Schmidt R, Mitchell J, Scow K (2019) Cover cropping and no-till increase diversity and symbiotroph: saprotroph ratios of soil fungal communities. **Soil Biology and Biochemistry** 29:99-109.

Shahbaz M, Kuzyakov Y, Sanaullah M, Heitkamp F, Zelenev V, Kumar A, Blagodatskaya E (2017) Microbial decomposition of soil organic matter is mediated by quality and quantity of crop residues: mechanisms and thresholds. **Biology and Fertility of Soils** 53:287-301.

Silva EE, Azevedo PHS, De-Polli H (2007a) **Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C)**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 6 p.(Comunicado técnico, 96).

Silva EE, Azevedo PHS, De-Polli H (2007b) **Determinação do nitrogênio da biomassa microbiana do solo (BMS-N)**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 6 p. (Comunicado técnico, 96).

Singh S, Ghoshal N, Singh K (2007) Variations in soil microbial biomass and crop roots due to differing resource quality inputs in a tropical dryland agroecosystem. **Soil Biology and Biochemistry** 39:76-86.

Six J, Frey SD, Thiet RK, Batten KM (2006) Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Science Society of America Journal** 70:555-569.

Six J, Guggenberger G, Paustian K, Haumaier L, Elliott ET, Zech W (2001) Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates. **European Journal of Soil Science** 52:607-618.

Sollins P, Kramer MG, Swanston C, Lajtha K, Filley T, Aufdenkampe AK, Wagai R, Bowden RD (2009) Sequential density fractionation across soils of contrasting mineralogy: evidence for both microbial-and mineral-controlled soil organic matter stabilization. **Biogeochemistry** 96:209-231.

Sparling G (1992) Ratio on microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Soil Research** 30:195-207.

Sparling GP, West AW (1988) A direct extraction method to estimate soil microbial C: calibration in situ using microbial respiration and ^{14}C labelled cells. **Soil Biology and Biochemistry** 20:337-343.

Spence A, Simpson AJ, McNally DJ, Moran BW, McCaul MV, Hart K, Paull B, Kelleher BP (2011) The degradation characteristics of microbial biomass in soil. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 75:2571-2581.

SSSA - Soil Science Society of America (2008) **Glossary of soil science terms**. Madison: SSAA.

SSSA - Soil Science Society Of America (1997) **Glossary of soil science terms**. Madison: SSAA, 134p.

Stevenson FJ (1994) **Humus chemistry**: genesis, composition, reactions. New York: John Wiley & Sons.

Stewart CE, Moturi P, Follett RF, Halvorson AD (2015) Lignin biochemistry and soil N determine crop residue decomposition and soil priming. **Biogeochemistry** 124:335-351.

Stewart CE, Paustian K, Conant RT, Plante AF, Six J (2008) Soil carbon saturation: evaluation and corroboration by long-term incubations. **Soil Biology and Biochemistry** 40:1741-1750.

Sturm DJ, Peteinatos G, Gerhards R (2018) Contribution of allelopathic effects to the overall weed suppression by different cover crops. **Weed Research** 58:331-337.

Tate KR, Ross DJ, Feltham CW (1988) A direct extraction method to estimate soil microbial C: effects of experimental variables and some different calibration procedures. **Soil Biology and Biochemistry** 20:329-335.

Thapa R, Mirsky SB, Tully KL (2018) Cover crops reduce nitrate leaching in agroecosystems: a global meta-analysis. **Journal of Environmental Quality** 47:1400-1411.

Tiecher T (2016) **Práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água**. Porto Alegre: UFRGS, 186p.

Tivet F, de Moraes Sa JC, Lal R, Borszowskei PR, Briedis C, dos Santos JB, Bouzinac S (2013) Soil organic carbon fraction losses upon continuous plow-based tillage and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub tropical and tropical regions of Brazil. **Geoderma** 209:214-225.

Trumbore S (2009) Radiocarbon and soil carbon dynamics. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences** 37:47-66.

Van Soest PJ (1994) **Nutritional ecology of the ruminant**. 2 ed. Ithaca: Cornell University Press, 476p.

Wander M (2004) Soil organic matter fractions and their relevance to soil function. In: Magdoff F, Weil RR (Eds.) **Soil organic matter in sustainable agriculture**. New York: CRC Press, p. 67-102.

Wardle DA (1992) A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. **Biological Reviews** 67:321-358.

Weiler DA (2012) **Decomposição de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo e emissões de óxido nitroso**. 73 f. Dissertação (Mestrado Ciência do Solo) – UFSM, Santa Maria.

Wutke EB, Calegari A, Wildner LP (2014) Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para seu uso. In: Filho OFL, Ambrosano EJ, Rossi F, Carlos JAD (Eds.) **Adubação verde e plantas cobertura no Brasil**: fundamentos e prática. Brasília: Embrapa, v. 1, p. 60-168.

Xavier FADS, Maia SMF, Oliveira TSD, Mendonça EDS (2006) Biomassa microbiana e matéria orgânica leve em solos sob sistemas agrícolas orgânico e convencional na Chapada da Ibiapaba-CE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 30:247-258.

Xu X, Thornton PE, Post WM (2013) A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. **Global Ecology and Biogeography** 22:737-749.

Yao Z, Xu Q, Chen Y, Liu N, Li Y, Zhang S, Weidong C, Bingnian Z, Wang Z, Zhang D, Adl S, Gao Y (2021) Leguminous green manure enhances the soil organic nitrogen pool of cropland via disproportionate increase of nitrogen in particulate organic matter fractions. **Catena** 207:105574.

Zech W, Senesi N, Guggenberger G, Kaiser K, Lehmann J, Miano TM, Miltner A, Schroth G (1997) Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma** 79:117-161.

Zechmeister-Boltenstern S, Keiblinger KM, Mooshammer M, Peñuelas J, Richter A, Sardans J, Wanek W (2015) The application of ecological stoichiometry to plant-microbial – soil organic matter transformations. **Ecological Monographs** 85:133-155.

Zhang N, Wan S, Li L, Bi J, Zhao M, Ma K (2008) Impacts of urea N addition on soil microbial community in a semi-arid temperate steppe in northern China. **Plant and Soil** 311:19-28.