



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA BACHARELADO

EDÉSIO RAFAEL CUNHA PEREIRA

**FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DE UM ARGISSOLO ENRIQUECIDO COM
CÁLCIO EM FUNÇÃO DA QUALIDADE DA BIOMASSA APLICADA**

SÃO LUIS
2022

EDÉSIO RAFAEL CUNHA PEREIRA

**FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DE UM ARGISSOLO ENRIQUECIDO COM
CÁLCIO EM FUNÇÃO DA QUALIDADE DA BIOMASSA APLICADA**

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia
Bacharelado do Centro de Ciências Agrárias da
Universidade Estadual do Maranhão, como
requisito para obtenção do título de Engenheiro
Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura
Coorientadora: MSc. Jéssica de Freitas Nunes
Pires

SÃO LUIS
2022

Pereira, Edésio Rafael Cunha.

Frações da matéria orgânica de um argissolo enriquecido com cálcio em função da qualidade da biomassa aplicada / Edésio Rafael Cunha Pereira. – São Luís, 2022.

58 f

Monografia (Graduação) – Curso de Agronomia Bacharelado, Universidade Estadual do Maranhão, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura.

1.Cidagem de nutrientes. 2.Segurança alimentar. 3.Sustentabilidade.
I.Título.

CDU: 631.859

Elaborado por Giselle Frazão Tavares - CRB 13/665

EDÉSIO RAFAEL CUNHA PEREIRA

**FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DE UM ARGISSOLO ENRIQUECIDO COM
CÁLCIO EM FUNÇÃO DA QUALIDADE DA BIOMASSA APLICADA**

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia
Bacharelado do Centro de Ciências Agrárias da
Universidade Estadual do Maranhão, como requisito
para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovada em: 19/01/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura (Orientador)
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Dra. Katia Pereira Coelho
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dra. Ana Maria Silva de Araújo
Universidade Estadual do Maranhão

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho primeiramente à Deus por ter me dado coragem para começar essa caminhada. Dedico também aos meus pais por acreditarem em mim e pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

A DEUS em primeiro lugar, por ter me guiado e dado sabedoria em todos os momentos dessa jornada, me concedendo saúde e disposição para enfrentar os desafios que surgiram.

À minha mãe e meu pai, Dinalva Cunha e Josimar Pereira (em memória), por todo amor, incentivo, inspiração e apoio. Sem os valores e a criação que vocês me deram, nunca me tornaria a pessoa que sou hoje. Também a meus irmãos Éder Fernando e Edir Carlos e a todos meus familiares, pelo companheirismo e apoio nos momentos mais difíceis. Agradeço também a minha namorada Myllainne Eduarda, por todo apoio ao longo dessa caminhada.

Ao professor Emanuel Gomes de Moura, orientador deste trabalho, pelos importantes ensinamentos e pela paciência e disposição no esclarecimento das dúvidas que surgiram no seu decorrer.

A minha coorientadora Jéssica Freitas, pela paciência e por todos os ensinamentos, por me auxiliar no desenvolvimento deste trabalho e se mostrar à disposição para esclarecer minhas dúvidas.

A todos os meus colegas, pelo apoio e ajuda nos momentos de dificuldade. Ao longo desses anos, vocês me ajudaram a crescer e amadurecer, tanto pessoalmente como profissionalmente.

Agradeço a Cinthya Vasconcelos, por toda ajuda ao longo da graduação e no decorrer dessa pesquisa, agradeço o companheirismo e por ser minha dupla de faculdade por todos esses anos, serei eternamente grato.

A todos os professores e funcionários do curso de Agronomia da UEMA por estarem sempre a nossa disposição no momento de necessidade.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para que esse objetivo fosse alcançado.

Porque sou eu que conheço os planos que tenho para vocês, diz o Senhor, planos de fazê-los prosperar e não de causar dano, planos de dar a vocês esperança e um futuro.

Jeremias 29:11

RESUMO

A agricultura intensiva causa a degradação do solo e contribui para o aquecimento global devido às emissões de CO₂ liberadas na atmosfera como resultado da conversão de ecossistemas nativos em agrícolas. Nesse contexto, a matéria orgânica do solo (MOS) é essencial para a manutenção da produtividade dos solos tropicais. Este estudo tem como objetivo determinar as variações das frações de carbono de um ARGISSOLO enriquecido com cálcio submetido a um sistema de plantio direto e a aplicação de biomassa de diferentes qualidades. O experimento foi conduzido na área experimental da Universidade Estadual do Maranhão, campus de São Luís. Neste experimento, as árvores foram previamente estabelecidas em 1996 e, no ano de 2020, o número de parcelas do experimento foi reduzido para duas, as quais foram divididas em relação a presença ou ausência do capim Mombaça. O delineamento utilizado foi o de blocos ao acaso, com 4 blocos e 6 tratamentos, que são: Sombreiro + Leucena (S+L); Acácia + Leucena (A+L); Leucena + Gliricídia (L+G); Acácia + Gliricídia (A+G); Sombreiro + Gliricídia (S+G) e Controle. As análises feitas foram em relação às frações da matéria orgânica do solo a partir do carbono orgânico total e de suas frações, carbono orgânico particulado e associado ao mineral, além de indicadores como biomassa microbiana do solo e dos atributos químicos quanto a Ca⁺² e matéria orgânica. Os resultados desse estudo confirmam a nossa hipótese de que biomassa de maior qualidade favorece o aumento da fração da MOS associada ao mineral. As variações das frações da matéria orgânica, do quociente microbiano e da relação carbono orgânico associado ao mineral/biomassa microbiana do solo, causaram um aumento da fração estável da MOS. Esses resultados indicam que o uso da biomassa de alta qualidade é uma estratégia adequada para aumentar o sequestro de carbono no solo, que pode contribuir decisivamente para diminuir a liberação de CO₂ para a atmosfera, mudar a aptidão das terras e emancipar os agricultores do trópico úmido.

Palavras-chave: Ciclagem de nutrientes. Segurança alimentar. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Intensive agriculture causes land degradation and contributes to global warming due to CO₂ conditions released into the atmosphere because of the conversion of native to agricultural ecosystems. In this context, soil organic matter (MOS) is essential for maintaining the productivity of tropical soils. This study aims to determine the variations in the carbon fractions of an ARGISSOL enriched with calcium submitted to a no-tillage system and the application of biomass of different qualities. The experiment was conducted in the experimental area of the State University of Maranhão, São Luís campus. In this experiment, the trees were previously prepared in 1996 and, in 2020, the number of plots of the experiment was reduced for two, which were divided in relation to the presence or absence of Mombaça grass, the design used for randomized blocks, with 4 blocks and 6 treatments, which are: Sombreiro + Leucena (S + L); Acacia + Leucena (A + L); Leucena + Glyricidia (L + G); Acacia + Glyricidia (A + G); Sombreiro + Gliricidia (S + G) and Control. The analyzes carried out were in relation to the fractions of organic matter in the soil, from the total organic carbon and its fractions, particulate organic carbon and associated with the mineral, as well as indicators such as soil microbial biomass and chemical attributes for Ca + 2 and organic matter. The results of this study confirm our hypothesis that higher quality biomass favors an increase in the MOS fraction associated with the mineral. The variations of the organic matter fractions, the microbial quotient and the organic carbon associated with mineral / soil microbial biomass ratio caused an increase in the stable fraction of MOS. These results indicate that the use of high-quality biomass is an adequate strategy to increase soil carbon sequestration, which can decisively contribute to reduce the release of CO₂ into the atmosphere, change land suitability and emancipate farmers from the humid tropics.

Keywords: Food safety. Nutrient cycling. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** Croqui do delineamento experimental , localizado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA 24
- Figura 2** Valores do quociente microbiano (qMic) na profundidade de 0-10 cm , de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA.S+L = Sombreiro+Leucena ; A+L= Acácia+Leucena ; L+G= Leucena+Gliricidia ; A+G = Acácia+Gliricidia ; S+G= Sombreiro+Gliricidia . Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey 30
- Figura 3** Valores do quociente microbiano (qMic) na profundidade de 10-20 cm , de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA. S+L = Sombreiro+Leucena ; A+L= Acácia+Leucena ; L+G= Leucena+Gliricidia ; A+G = Acácia+Gliricidia ; S+G= Sombreiro+Gliricidia . Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey 32
- Figura 4** Valores de carbono orgânico total na profundidade de 0-10 cm , de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA.S+L = Sombreiro+Leucena ; A+L= Acácia+Leucena ; L+G= Leucena+Gliricidia ; A+G = Acácia+Gliricidia ; S+G= Sombreiro+Gliricidia . Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey 33
- Figura 5** Valores de carbono orgânico total na profundidade de 10-20 cm , de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA.S+L = Sombreiro+Leucena ; A+L= Acácia+Leucena ; L+G= Leucena+Gliricidia ; A+G = Acácia+Gliricidia ; S+G= Sombreiro+Gliricidia . Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey 35

Figura 6 Valores de carbono orgânico particulado na profundidade de 0-10 cm , de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA. S+L = Sombreiro+Leucena ; A+L= Acácia+Leucena ; L+G= Leucena+Gliricidia ; A+G = Acácia+Gliricidia ; S+G= Sombreiro+Gliricidia . Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey 36

Figura 7 Valores de carbono orgânico particulado na profundidade de 10-20 cm , de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA.S+L = Sombreiro+Leucena ; A+L= Acácia+Leucena ; L+G= Leucena+Gliricidia ; A+G = Acácia+Gliricidia ; S+G= Sombreiro+Gliricidia . Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey 38

Figura 8 Valores de carbono orgânico associado ao mineral na profundidade de 0-10 cm de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA.S+L = Sombreiro+Leucena ; A+L= Acácia+Leucena ; L+G= Leucena+Gliricidia ; A+G = Acácia+Gliricidia ; S+G= Sombreiro+Gliricidia . Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey 40

Figura 9 Valores de carbono orgânico associado ao mineral na profundidade de 10-20 cm , de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA. S+L = Sombreiro+Leucena ; A+L= Acácia+Leucena ; L+G= Leucena+Gliricidia ; A+G = Acácia+Gliricidia ; S+G= Sombreiro+Gliricidia . Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey 41

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** – Relação C/N da combinação de biomassas, com e sem a presença do capim Mombaça, aplicadas na área experimental Universidade Estadual do Maranhão 29
- Tabela 2** – Valores da relação entre carbono orgânico associado ao mineral (COAM)/ carbono da biomassa microbiana (CBM) nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA..... 43
- Tabela 3** – Atributos químicos do solo (cálcio -Ca , matéria orgânica -MO e cálcio acumulado no solo -CaAS) nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm , de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA.....44

SUMÁRIO

| | | |
|------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 15 |
| 2.1 | GERAL | 15 |
| 2.2 | ESPECÍFICOS | 15 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 3.1 | Sistema de cultivo em aleias | 16 |
| 3.2 | Matéria orgânica do solo..... | 16 |
| 3.3 | Carbono orgânico do solo..... | 17 |
| 3.4 | Frações da matéria orgânica do solo | 18 |
| 3.5 | Biomassa microbiana do solo | 19 |
| 3.6 | Quociente microbiano | 20 |
| 3.7 | Uso de biomassa de diferentes qualidades e a relação dos cátions polivalentes (Cálcio) | 21 |
| 3.8 | Eficiência do uso do carbono (EUC) | 21 |
| 4 | METODOLOGIA | 23 |
| 4.1 | Caracterização da área experimental | 23 |
| 4.2 | Histórico da área experimental | 23 |
| 4.3 | Delineamento experimental | 23 |
| 4.4 | Amostragem de solo | 25 |
| 4.5 | Análises químicas | 25 |
| 4.6 | Análise do carbono orgânico total do solo (COT) | 25 |
| 4.7 | Análise do fracionamento granulométrico da matéria orgânica do solo | 26 |
| 4.8 | Análise da biomassa microbiana do solo | 27 |
| 4.9 | Quociente microbiano (qMic) | 28 |
| 4.10 | Relação entre carbono orgânico associado ao mineral/ biomassa microbiana do solo | 29 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.11 | Qualidade da biomassa | 29 |
| 4.12 | Análises estatísticas | 29 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 30 |
| 5.1 | Carbono orgânico total (COT) | 30 |
| 5.2 | Carbono orgânico particulado (COP) | 32 |
| 5.3 | Carbono orgânico associado ao mineral (COAM) | 36 |
| 5.4 | Quociente microbiano (qMic) | 39 |
| 5.5 | Relação carbono orgânico associado ao mineral/ carbono da biomassa microbiana | 42 |
| 5.6 | Atributos químicos | 44 |
| 6 | CONCLUSÃO | 46 |
| | REFERÊNCIAS | 47 |

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população e do consumo de alimentos cria demandas sem precedentes sobre a agricultura e os recursos naturais. Para atender às necessidades futuras de segurança alimentar e sustentabilidade do mundo, a produção de alimentos deve crescer substancialmente enquanto, ao mesmo tempo, o uso da agricultura de forma nociva ao meio ambiente deve diminuir drasticamente (FOLEY et al., 2011).

Nas regiões central e norte do Maranhão predominam solos derivados da Formação Itapecuru, tomando 60% do território maranhense, caracterizando-se pela predominância de arenitos finos argilosos (MOURA; ALBUQUERQUE; AGUIAR, 2008). A região é caracterizada pela presença de solos de baixa fertilidade natural, susceptíveis a coesão por apresentar baixos teores de ferro (Fe) e carbono orgânico do solo, que aliados aos altos índices pluviométricos e altas temperaturas, contribuem para a decomposição acelerada da matéria orgânica particulada e dificulta ainda mais a produção agrícola (SENA, 2020).

Por conta disso, ainda é observado a utilização de agricultura itinerante, principalmente a técnica do corte e queima, em que o agricultor apenas muda de terra para produzir novamente. Esta técnica agrícola consiste no corte da vegetação primária para posteriormente realizar a queima e fazer o plantio sobre as cinzas. Após a colheita, a área permanece em pousio por um período, enquanto o agricultor muda de área e recomeça o ciclo com a conversão de novas superfícies de floresta primária em campos agrícolas. Para os agricultores, em tempos de muitas áreas disponíveis, esse sistema se tornava mais vantajoso pelo baixo custo e pela rapidez na limpeza da área (SENA, 2020). Nesse sentido, a agricultura intensiva causa a degradação do solo e contribui para o aquecimento global devido às emissões de dióxido de carbono (CO₂) liberadas na atmosfera como resultado da conversão de ecossistemas nativos em agrícolas e do aumento da mineralização de matéria orgânica do solo (MOS) devido às operações de cultivo (FOLEY et al., 2005; HOWDEN et al., 2007; LAL, 2013). Sabe-se que os solos desempenham um papel importante no ciclo global do carbono (C) e são cruciais para a gestão das mudanças climáticas (RUMPEL et al., 2018).

No entanto, a adoção de práticas sustentáveis de manejo do solo - como redução do cultivo, aplicação de compostos orgânicos, cultivo de plantas de cobertura e implementação de medidas de retenção de resíduos de colheita - pode contribuir para a mitigação das mudanças

climáticas, permitindo que os agroecossistemas sejam mais resilientes aos seus impactos, melhorando o sequestro de carbono nos solos (ALMAGRO et al., 2016, 2017; STAVI et al., 2016; CHENU et al., 2019). Arelado a isto tem-se a eficiência do uso do carbono (EUC) que se trata da proporção do carbono orgânico absorvido que será alocado para o crescimento microbiano, responsável por uma importante representação sintética do metabolismo na comunidade C microbiana que apresenta a partição do fluxo entre a respiração e o crescimento microbiano (ZHENG et al., 2016).

Nesse contexto, a matéria orgânica do solo (MOS) é essencial para a manutenção da produtividade dos solos tropicais. Isso acontece devido ao fato de que ela fornece energia e proporciona a diversidade biológica que acaba por ajudar a garantir que tanto a qualidade do solo quanto a funcionalidade do ecossistema sejam mantidas (LARSON e PIERCE, 1994; WENDLING et al., 2010). A estabilização da matéria orgânica está associada a ligação existente entre as superfícies minerais e conseqüentemente aos cátions polivalentes no solo, além do que, os mecanismos para a estabilização são influenciados tanto por fatores bióticos quanto abióticos (VON LÜTZOW et al., 2006; BALESSENT e BALABANE, 1996; GHAFOR et al., 2017; RASSE et al., 2005). Quando se trata do uso de diferentes qualidades de biomassa, a combinação de leguminosas de alta e baixa qualidade permite que o solo desempenhe serviços ecossistêmicos como a ciclagem de nutrientes (AGUIAR et al., 2010). Dessa forma, espera-se que diferentes qualidades da biomassa gerem diferentes composições das frações de matéria orgânica do solo e que biomassa de maior qualidade favoreça o aumento da fração da MOS associada ao mineral.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Determinar as variações das frações de carbono de um ARGISSOLO enriquecido com cálcio submetido a um sistema de plantio direto e a aplicação de biomassa de diferentes qualidades.

2.2 ESPECÍFICOS

- Avaliar o fracionamento granulométrico da matéria orgânica;
- Verificar a influência das diferentes qualidades de biomassas sob a estabilização da matéria orgânica em um solo enriquecido com cálcio;
- Estipular se a razão carbono da biomassa microbiana/carbono orgânico total reflete na qualidade da matéria orgânica do solo;
- Determinar o efeito da relação entre carbono orgânico associado ao mineral/carbono da biomassa microbiana sobre a eficiência do uso de carbono ,que impulsiona quanto da biomassa viva foi transformada em carbono estabilizado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sistema de cultivo em aleias

Um sistema em aleias é conhecido por ser um plantio de árvores ou arbustos que tem na sua composição comumente as leguminosas que preferencialmente tenham simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio, alternados em faixas com culturas anuais. Essas leguminosas, utilizadas no cultivo em aleias, são podadas, servem como adubo verde e proporcionam ao solo uma melhoria tanto na atividade biológica quanto no ciclo de nutrientes (PÉREZ-MARIN; MENEZES; SALCEDO, 2007; LOSS et al., 2009; PAULINO et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2018).

Os arbustos perenes e árvores que são encontradas nesse sistema podem explorar tanto os nichos de nutrientes quanto a água em camadas mais densas, além disso, podem interromper o desenvolvimento na seca, recomeçando de forma mais rápida quando apresenta condições de umidade favorável (SANTOS et al., 2018). Espécies estas que podem fixar importantes quantidades de nitrogênio (N) do ar, sendo capazes de armazenar nutrientes na biomassa, além de poderem proteger contra os ventos e oferecer sombra, permitindo que seja criado um clima benéfico. O *alley cropping* (cultivo em aleias) é conhecida por ser de baixo custo e proporcionar ótimos efeitos (NOGUEIRA, 2012).

A prática em aleias permite que seja produzido uma grande quantidade de biomassa, em que, através dessa biomassa, permite com que ela seja incorporada ao solo, fornecendo nutrientes ao solo (BERTALOT et al., 2010; MUNROE e ISAAC, 2014), que ajuda na melhoria da qualidade do solo, através da produção de entrada da matéria orgânica (MO), e aumenta o seu estoque de carbono orgânico (CARDINAEL et al., 2015).

3.2 Matéria orgânica do solo

A matéria orgânica do solo (MOS) pode ser considerada como um dos melhores indicadores para avaliar a sua qualidade. Acredita-se que um solo que apresente um elevado teor de matéria orgânica está sujeito a manter a população microbiana ali presente mais estável no decorrer dos anos. Isso pode ocorrer devido a existência de uma riqueza de nichos ecológicos e heterogeneidade das fontes de carbono (POWLSON et al., 1987; GRAYSTON e JONES, 1996).

A MOS é um componente essencial para o solo, pois ela possui sua origem dos resíduos vegetais que são inseridos ao solo através das plantas, que fixam fotossinteticamente o carbono (C) da atmosfera. Esses resíduos que são adicionados ao solo são fracionados primeiramente pela fauna presente e logo depois são decompostos pelos microrganismos. Uma parcela desse C que foi incorporado é oxidado a CO₂ e o restante se torna matéria orgânica, em que irá interagir com a matéria mineral do solo (DE BONA, 2005).

As funções da matéria orgânica são extensas, podendo agir tanto no enriquecimento das condições físicas, quanto na aeração, retenção e armazenamento da água, além de tudo, tem uma participação nas propriedades químicas e físico-químicas, fornecendo nutrientes às plantas e uma grande capacidade de troca catiônica do solo (TCS). A MOS oferece um ambiente mais conveniente para o estabelecimento e atividade microbiana presente no solo (FIGUEIREDO et al., 2013). Ademais, ela possui um papel essencial na manutenção da produtividade nos solos tropicais, devido ao fornecimento de substratos e energia (WENDLING et al., 2010).

A matéria orgânica associada a um bom estado da estrutura do solo permite que tenha um aumento na capacidade de retenção de água e concede o desenvolvimento radicular em profundidade, como consequência plantas saudáveis, possuindo um rápido crescimento e resistência a estresses hídricos e nutricionais, pois o avanço da MOS também aumenta o número de microrganismos que são eficientes para mobilizar nutrientes em direção às raízes (ROSA et al., 2011).

A matéria orgânica do solo é composta pelo carbono orgânico, em média, 58% da matéria orgânica total. O carbono orgânico é oriundo do aporte de biomassa vegetal pelos constituintes solúveis das plantas, exsudados de raízes, e da modificação desses pela ação dos microrganismos. Esse fornecimento da MOS tem um papel essencial na qualidade do solo, em que possui uma grande participação para que seja possível ter sustentabilidade nos sistemas produtivos (SILVA e MENDONÇA, 1997; DA SILVA., 2020).

3.3 Carbono orgânico do solo

De acordo com Silva e Mendonça (1997), quando se trata da entrada de carbono no solo, está relacionado com o aporte de resíduos da biomassa aérea e radicular das plantas, a liberação de exsudados radiculares, a lavagem de componentes solúveis da planta feita pela água da chuva e modificação dos materiais tanto pelos macros quanto microrganismos presentes no solo. O carbono orgânico do solo (COS) é uma importante propriedade, pois desempenha

uma série de funções no ambiente e está relacionada com a produção agrícola. O COS está relacionado com os fluxos de CO₂ para a atmosfera e é um grande reservatório de carbono do ecossistema terrestre (BATJES; SOMBROEK, 1997).

O carbono orgânico do solo é considerado um dos principais indicadores de qualidade, em que a sua avaliação é essencial para verificar a sustentabilidade de um agroecossistema. Além disso, um componente de fácil e rápida medição e, por se correlacionar com outros atributos, o COS pode ser um indicador-chave para avaliar aspectos físicos, biológicos e químicos do solo (JERKE et al., 2012).

Quanto a quantidade de COS, são influenciados por distintos fatores, como o arranjo espaço-temporal das espécies vegetais presentes, o uso de culturas para cobertura e com alta produção de fitomassa, tanto pela parte aérea quanto pelo sistema radicular, podendo também interferir no estoque de C e N e por conseguinte nas diferentes frações da matéria orgânica. Além disso, o estoque de COS é controlado principalmente pelas condições climáticas, como temperatura e precipitação, no qual aumenta com uma maior precipitação e temperaturas mais baixas (JANZEN et al., 2006 ; DIEKOW et al., 2005; HENGL et al., 2015; MINASNY et al., 2013).

3.4 Frações da matéria orgânica do solo

A importância da matéria orgânica no solo é devido ao fornecimento de nutrientes às plantas, retenção de cátions, complexação de elementos tóxicos e micronutrientes, estabilização da estrutura, infiltração e retenção de água, aeração e nas atividades microbianas, integrando assim um dos componentes mais essenciais na produtividade de uma cultura agrícola (SILVA e MENDONÇA, 1997).

O processo que envolve a alteração do carbono orgânico vai refletir diretamente na qualidade do solo, não sendo apenas os teores totais de matéria orgânica essenciais na avaliação quanto as transformações que o solo pode sofrer, mas também a identificação e quantificação das formas da MOS por meio de técnicas de fracionamento, que podem ser físicas ou químicas (CUNHA et al., 2009; ROSA et al., 2017).

O fracionamento da matéria orgânica do solo é uma prática que vem sendo utilizada em estudos que envolvem os sistemas de produção e são eficientes na avaliação das

transformações oriundas dos distintos tipos de uso e manejo do solo, proporcionando resultados conclusivos referentes a sua qualidade a partir das ações antrópicas (ASSUNÇÃO, 2016).

O carbono orgânico total do solo pode ser dividido em grupos distintos, para ocorrer o método de fracionamento da matéria orgânica, sendo conhecidos por: carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado ao mineral (COAM) (COTRUFO et al., 2019; HADDIX et al., 2020; LAVALLEE et al., 2020). O COP é composto principalmente de serapilheira fragmentada e relativamente não decomposta, sendo considerado vulnerável a perturbações e possui tempo de recuperação mais rápido que o associado ao mineral (LAVALLEE et al., 2020; POEPLAU et al., 2018).

Já em relação ao COAM, compreende composto de pequeno peso molecular, o que é resultante do processamento microbiano, isso significa que o carbono associado ao mineral funciona de forma mais lenta do que o particulado e pode permanecer no solo por longos períodos (MIKUTTA et al., 2019; SOKOL et al., 2019).

A determinação dessas frações pode proporcionar informações a respeito da qualidade edáfica e detectar impactos ambientais a partir de ações antrópicas (LOSS et al., 2011; SANTOS et al., 2017). Essas informações podem ser essenciais na determinação de soluções para a correção e preservação do solo em áreas agrícolas, através da avaliação da qualidade e estudos conjuntos de sustentabilidade ambiental (BIELUCZYK, 2017; KUNDE et al., 2016 ; SILVA., 2017).

3.5 Biomassa microbiana do solo

A biomassa microbiana do solo (BMS) tem um papel essencial na manutenção dos ecossistemas, devido a sua atuação como um catalisador das mudanças físicas e químicas no solo, além disso , age como um reservatório de nutrientes disponíveis às plantas . Acompanhar a BMS permite observar possíveis transformações no solo, que é considerado uma boa indicadora das alterações vindas do manejo (SOUZA et al., 2006).

Quando se trata do carbono da biomassa microbiana, identifica-se ele como a fração viva da matéria orgânica do solo, constituída de bactérias, fungos, actinomicetos, protozoários e as algas. É um componente essencial para a avaliar a qualidade do solo, devido a BMS atuar nos processos de decomposição natural, relação na dinâmica dos nutrientes e regeneração da estabilidade dos agregados (SILVA et al., 2019). Ela está ligada ao conteúdo da MOS e 23%

do carbono orgânica total (COT) pertence ao carbono dessa biomassa microbiana (ARAÚJO et al., 2019).

A diversidade e abundância da biomassa microbiana do solo desempenham papéis importantes na sustentabilidade do ecossistema, mantendo funções essenciais do solo, por meio da renovação de carbono e nutrientes (SINGH; GUPTA ., 2018). Segundo Souza et al., (2010) “biomassa microbiana do solo funciona como compartimento reserva de carbono, nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S) no solo, elementos essenciais para o desenvolvimento vegetal e como catalisador na decomposição da matéria orgânica”.

3.6 Quociente microbiano

A razão entre a biomassa microbiana do solo e o carbono orgânico total indica a qualidade da matéria orgânica, em que para acompanhar a dinâmica da MOS, utiliza-se essa mesma divisão. A matéria orgânica do solo é o principal reservatório de organismos e nutrientes para as plantas. A diminuição ou aumento dela serve para definir a preservação dos ecossistemas naturais e os desequilíbrios dos agroecossistemas, sendo esse quociente usado para avaliação da sustentabilidade (VIEIRA., 2021).

Quando o $qMic$ apresenta alterações , reflete o aumento da matéria orgânica do solo, a eficiência da conversão de COT em carbono microbiano, as perdas de C do solo e a estabilização do carbono orgânico por frações minerais. O quociente microbiano é um bom indicador de qualidade do solo, isso ocorre devido a essa razão da BMS e C-org (SILVA et al., 2010).

Desse modo, se a biomassa microbiana estiver sob qualquer condição de estresse a capacidade de utilização do carbono orgânico do solo fica menor, representando então a diminuição do $qMic$. Caso tenha alteração da condição de estresse para uma condição favorável, haverá maior imobilização de carbono pela biomassa microbiana resultando em um aumento do índice do $qMic$ mesmo se os teores de carbono orgânico permanecerem inalterados. Logo, a obtenção do $qMic$ é imprescindível para permear a obtenção da qualidade biológica do solo (ALVES,2014).

3.7 Uso de biomassa de diferentes qualidades e a relação dos cátions polivalentes (Cálcio)

O uso das biomassas de diferentes qualidades em um sistema proporciona efeitos positivos em um solo. Leguminosas com baixa relação carbono/nitrogênio (C/N) são altamente eficientes para impulsionar o estoque de carbono orgânico do solo (COS) porque materiais orgânicos com baixa C/N e baixo conteúdo de lignina são benéficos para a manutenção saudável das atividades dos microrganismos do solo e impedem o efeito *priming*. Já resíduos com alta relação C/N, por se decomporem lentamente, possuem maiores efeitos na evaporação do solo, aumentando a MOS e, conseqüentemente, a sua capacidade de enraizamento (TIAN et al., 1995; MULUMBA e LAL, 2008; YAO et al., 2017). Sendo assim, segundo Moura et al. (2021), para ocorrer o aproveitamento dos serviços ecossistêmicos de forma eficaz, é preciso que seja inserido em um sistema o uso das leguminosas em esquema de combinação com resíduos de alta e baixa qualidade.

Segundo Ellerbrock e Greek, (2018), “para explicar os efeitos da biomassa de leguminosas no aumento da MOS, deve-se considerar as interações específicas entre cátions polivalentes e compostos derivados da decomposição da biomassa”. Além disso, utilizar o cálcio causa vantagens diretas, como o aumento da floculação e agregação no subsolo, possibilitando uma maior agregação do solo (SUMNER, 2009).

A utilização dos cations polivalentes, neste caso do cálcio, é importante por promover melhorias ao sistema, principalmente para a formação de matéria orgânica estabilizada. Em um solo enriquecido com os cations polivalentes, a matéria orgânica que está sendo derivada da biomassa vai interagir com o cálcio e os retém nas camadas superficiais, aprimorando ainda mais a estrutura do solo na zona da raiz (WUDDIVIRA e CAMPS-ROACH, 2007).

3.8 Eficiência do uso do carbono (EUC)

Uma das funções ameaçadas pelas mudanças climáticas atualmente é o armazenamento de carbono orgânico (C) nos solos (MELILLO et al., 2017 ; LI et al., 2018), que é crucial para a regulação do clima (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2014). Esse estoque de C é regulado em parte pela taxa e eficiência com que os micróbios que vivem no solo incorporam insumos de plantas frescas em sua biomassa e componentes mais estáveis da matéria orgânica do solo. Nesse sentido, tem-se a eficiência do uso do carbono (EUC) que se trata da proporção do carbono orgânico absorvido que será alocado para o crescimento microbiano, responsável por uma importante representação sintética do metabolismo na

comunidade C microbiana que apresenta a partição do fluxo entre a respiração e o crescimento microbiano (ZHENG et al.,2016).

A EUC pode ser diretamente afetada por mudanças globais, como aquecimento global e mudanças na umidade do solo devido a modificações nos regimes de precipitação (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2014; MANZONI et al.,2012). Enquanto isso, as mudanças globais também estão provocando mudanças na diversidade e na estrutura das comunidades microbianas (LEFF et al.,2015; MAESTRE et al.,2015). Compreender os impulsionadores da EUC é crucial para determinar o destino do carbono no solo.

Este parâmetro é usado em muitos modelos de ciclo de carbono para prever fluxos de carbono entre atmosfera e ecossistemas terrestres (VALENTINI et al., 2000). Uma pequena modificação da EUC pode contribuir para mudanças drásticas em previsões de carbono para modelos de ciclo biogeoquímico (MACINNIS-NG et al., 2011). Além disso, a previsão precisa da eficiência do uso do carbono pode ser um guia útil nas atividades de manejo em resposta às mudanças climáticas, uma vez que EUC mais alta provoca um maior sequestro de carbono da atmosfera (PIAO et al.,2010).

4 METODOLOGIA

4.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na área experimental da Universidade Estadual do Maranhão, campus de São Luís. As coordenadas geográficas do local apresentam 2° 35' de Latitude Sul e 44° 12' de Longitude Oeste do meridiano de Greenwich. O clima da região segundo a classificação de Köppen é do tipo AW', equatorial quente e úmido, com duas estações bem definidas: uma estação chuvosa que se estende de janeiro a junho e uma estação seca com déficit hídrico acentuado de julho a dezembro. A temperatura média da região situa-se em torno de 26,7°.

As precipitações variam de 1700 a 2300 mm anuais em que mais de 80% ocorrem de janeiro a maio. O solo do local do experimento apresenta características coesivas, determinadas pela relação entre a resistência a penetração e conteúdo volumétrico de água no solo (MOURA et al., 2009) e é classificado como ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico arênico, com 260 g kg⁻¹ de areia grossa, 560 g kg⁻¹ de areia fina, 80 g kg⁻¹ de silte e 100 g kg⁻¹ de argila (EMBRAPA, 2006).

4.2 Histórico da área experimental

Neste experimento, as árvores foram previamente estabelecidas em 1996, com sementes distribuídas em linhas duplas alternadas, distantes 0,5 m entrelinhas e 0,5 m entre plantas, sendo podadas anualmente. Em janeiro de 2001, as parcelas foram subdivididas em três. Em 2018 foi aplicado gesso agrícola na área, sendo 6 toneladas por hectare, que equivale a 1 tonelada de cálcio por hectare. No ano de 2020, o número de parcelas do experimento foi reduzido para duas, as quais foram divididas em relação a presença ou ausência do capim Mombaça.

4.3 Delineamento experimental

O tamanho das parcelas foi de 21m x 4m com as leguminosas espaçadas em 6m entre linhas simples e 0,5m entre linhas duplas. As leguminosas produtoras da biomassa aplicada na área foram *Acacia mangium* (acácia), *Clitoria fairchildiana* (sombreiro), conhecidas pelas baixas qualidades de resíduos e alta relação C/N quando comparadas a *Leucaena leucocephala* (leucena) e *Gliricidia sepium* (gliricídia), leguminosas que também foram avaliadas e são conhecidas pela alta qualidade de resíduos e baixa relação C/N. A poda da biomassa dessas

leguminosas serão combinadas entre si, o delineamento utilizado foi o de blocos ao acaso, com 4 blocos e 6 tratamentos, que são: Sombreiro + Leucena (S+L); Acácia + Leucena (A+L); Leucena + Gliricídia (L+G); Acácia + Gliricídia (A+G); Sombreiro + Gliricídia (S+G) e Controle, dentro das parcelas que se encontram as combinações de leguminosas desse experimento, foram divididas em subparcelas, para ser avaliado as combinações de biomassa com a presença do capim Mombaça e sem a presença do capim Mombaça.

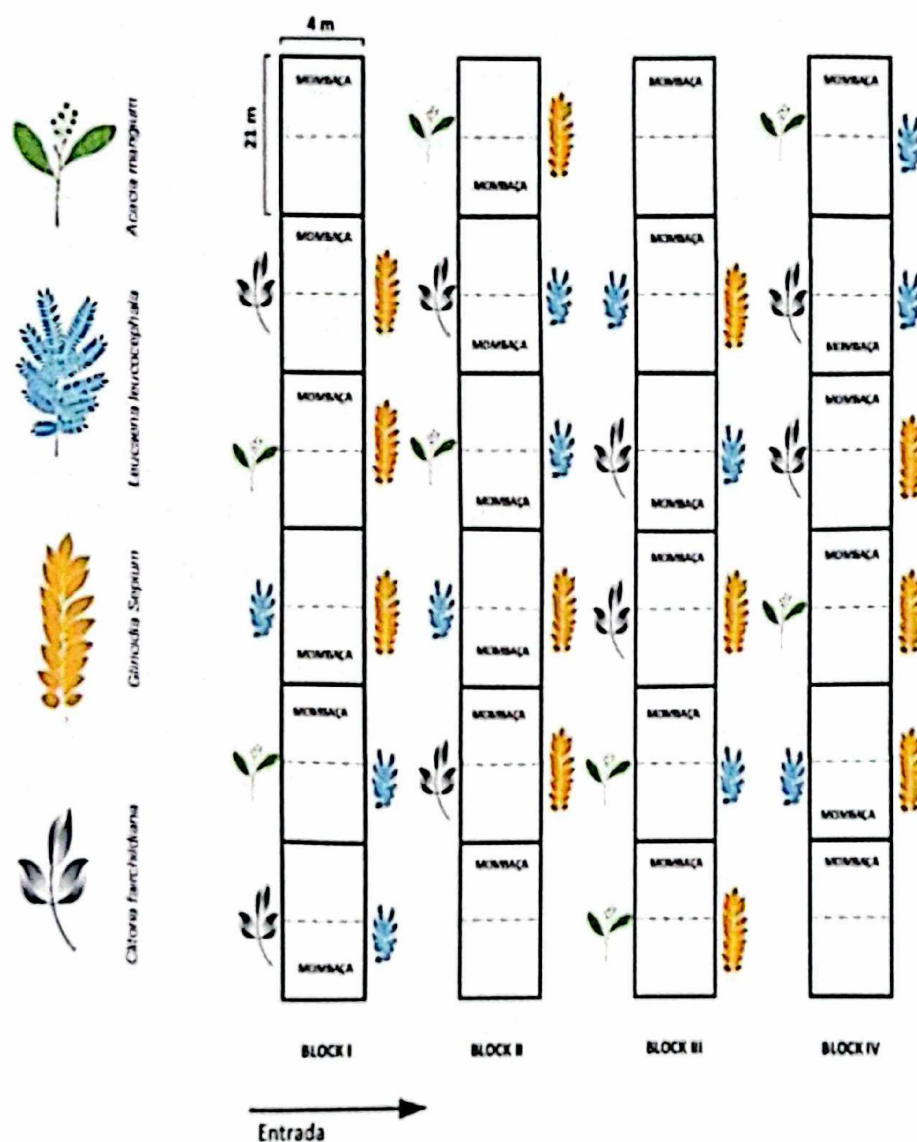


Figura 1 Croqui do delineamento experimental, localizado na Universidade Estadual do Maranhão, em São Luís-MA.

Fonte: PEREIRA, E.R.C (2021)

4.4 Amostragem de solo

As amostras de solo foram coletadas com trado do tipo sonda, em formato zig - zag no mês de maio de 2021, com a retirada de 3 amostras simples por parcela para obter uma amostra composta nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm.

4.5 Análises químicas

Quanto à análise química do solo, as amostras foram analisadas para Ca^{+2} , usando o ES ICP Espectrômetro de análise, segundo metodologia do Raij et al (2001) e matéria orgânica do solo, em g/dm^3 , pela seguinte equação: ($\text{MOS} = \text{COS total} \times 1,72$). O acúmulo de Ca em kg/ ha nas duas profundidades foram calculados de acordo com as fórmulas: (Combinação de leguminosas + Mombaça – Controle + Mombaça), (Combinação de leguminosas sem capim - Controle sem capim) e (Controle + Mombaça – Controle).

4.6 Análise do carbono orgânico total do solo (COT)

Foi determinado o carbono orgânico total pelo método adaptado de Yeomans e Bremner (1998), onde foi pesado 0,5 g de solo peneirado, seco ao ar e macerado em tubos de ensaio, adicionado 5 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) e 5 ml da solução de dicromato de potássio, levados ao bloco digestor na temperatura de 170°C por 1 hora, em seguida deixados para esfriar e transferidos para Erlenmeyer com o auxílio de 80 mL de água deionizada, foi acrescentado três gotas da solução indicadora difenilamina e titulados com a solução de sulfato ferroso amoniacal. Para o branco foi preparado 6 tubos de ensaio somente com a solução de dicromato e o ácido sulfúrico (brancos frios e quentes), 3 deles foram para dentro do bloco e 3 ficaram fora do bloco.

O cálculo do teor de carbono orgânico foi realizado a partir das equações 1 e 2:

$$A = \frac{[(V_{ba} - V_{am})(V_{bn} - V_{ba})]}{V_{bn}} + (V_{ba} - V_{am}) \quad (1)$$

Em que: V_{ba} = volume gasto na titulação do branco controle com aquecimento;

V_{bn} = volume gasto na titulação do branco controle sem aquecimento;

V_{am} = Volume gasto na titulação da amostra

$$C_{org} = \frac{(A)(M)(R) \times 1000}{M_{am}} \quad (2)$$

C_{org} = Carbono orgânico total ($g.kg^{-1}$)

M = Molaridade do sulfato ferroso

R = 3, constante referente ao número de mols de Cr_2O_7 que reagem com o Fe^{2+} (1/6), multiplicado pelo número de mols de Cr_2O_7 que reagem com o C (3/2), multiplicado pela massa atômica do C (12).

1000 = Conversão de unidade ($mg.mg^{-1}$ para $g.kg^{-1}$)

Man = Massa da amostra em mg (500 mg)

4.7 Análise do fracionamento granulométrico da matéria orgânica do solo

O fracionamento granulométrico da MOS foi realizado de acordo com o método adaptado de Cambardella e Elliott (1992). O princípio do método consiste em separar o carbono orgânico do solo em duas frações: carbono orgânico particulado (COP), menos decomposto e mais recentemente depositado no solo, e carbono associado aos minerais (COM), mais recalcitrante e humificado.

Foram pesados 10 gramas de solo seco ao ar tamisados em malha de 2 mm em copos de polietileno de 250 ml, e adicionados 40 ml de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio ($5 g L^{-1}$). Em seguida, as amostras foram agitadas por 16 horas em agitador horizontal, passadas por peneira de malha de 0,053 mm (270 Mesh) e enxaguadas várias vezes com água destilada até a remoção total da argila. O material particulado retido na peneira, ou fração particulada (FP), foi transferido para potes de plástico, com auxílio de jatos de água, e seco em estufa de circulação de ar forçada a $50^{\circ}C$ até atingir massa constante.

Após a secagem, o material foi pesado, determinando-se assim a massa da fração particulada (MFP). Em seguida, moído e homogeneizado com auxílio de um bastão de vidro para então ser submetido à determinação do carbono orgânico total (YEOMANS & BREMNER, 1988) que consiste na oxidação do carbono via dicromato de potássio, obtendo-se o teor de carbono da fração particulada do solo (CFP), sendo possível calcular o teor de carbono orgânico particulado (COP) do solo, de acordo com a equação a seguir:

$$COP = \frac{CFP \times MFP}{P_s}$$

Onde: COP = teor de carbono orgânico particulado do solo, em $g.kg^{-1}$; CFP = teor de carbono da fração particulada, em $g.kg^{-1}$; MFP = massa da fração particulada, em gramas;

P_s = massa da amostra inicial do solo, em gramas (20 gramas).

O teor de carbono associado a minerais (COAM) foi calculado pela diferença entre o carbono orgânico total, que seguiu a metodologia de Yeomans & Bremner, 1988 e o carbono orgânico particulado de acordo com a equação a seguir:

$$\text{COAM} = \text{COT} - \text{COP}$$

4.8 Análise da biomassa microbiana do solo

Foi determinado pelo método da fumigação extração, proposto Vance, Brookes e Jenkinson (1987), utilizando-se, em lugar do clorofórmio, o forno de microondas (2.450 Mhz, marca Electrolux, modelo MTD30) por três minutos, para eliminar os microrganismos e liberar os componentes celulares. O processo consiste na duplicação no número de amostras para que a metade passe pelo processo de fumigação. Foram pesadas 10 g de cada amostra de solo em placas de petri, totalizando 6 placas de petri por amostra de solo, e três delas serão para o processo de fumigação no microondas. As outras três repetições não fumigadas serão incubadas nas mesmas condições e tempo das amostras fumigadas, porém, sem a exposição ao microondas.

Para extração, todas as amostras foram transferidas para Erlenmeyer de 125 ml, no qual foram adicionados 50 ml de sulfato de potássio (K_2SO_4) a 0,5 M. O conjunto foi agitado por 30 minutos e, posteriormente, filtrado em papel filtro. A determinação do carbono da biomassa microbiana foi realizada pela digestão de 4 mL do extrato filtrado com 1 mL de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) a 0,066 M, 5 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4 (95%)) e 2,5 mL de ácido fosfórico (H_3PO_4 (85%)). Essa mistura foi aquecida por tempo de 5 minutos, contados a partir do surgimento das primeiras bolhas. Após resfriamento, foram acrescentados 35 mL de água deionizada, adicionado 2 gotas de difenilamina e feita uma titulação sob agitação magnética com uma solução de Sulfato Ferroso Amoniacal a 0,033 M. No controle, foram realizados os mesmos procedimentos com exceção do extrato que será somente o sulfato de potássio .

O cálculo do teor de C nos extratos fumigado e não-fumigado do solo foi obtido através da equação:

$$C(\text{mg C kg}^{-1} \text{ solo}) = \frac{(Vb - Va) \cdot M \cdot 0,003 \cdot V_1 \cdot 10^6}{Ps \cdot V_2}$$

Onde:

C - Carbono extraído do solo; Vb (mL) - volume do sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da solução controle (branco); Va (mL) volume de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da amostra; M - Molaridade exata do sulfato ferroso amoniacal; V₁ do extrator (K₂SO₄) utilizado; V₂ - alíquota pipetada do extrato para a titulação; 0,003 - miliequivalente do carbono; Ps (g) - massa de solo seco.

O cálculo da BMS-C é dado pela equação:

$$BMS(\text{mg C microbiano kg}^{-1} \text{ solo}) = FC \cdot kc^{-1}$$

utilizando kc=0,33 descrito por SPARLING & WEST (1988):

BMS - biomassa microbiana do solo em mg de C por kg⁻¹ de solo (ou ug g⁻¹); FC - fluxo obtido da diferença entre a quantidade de C (mg kg⁻¹), do cálculo do teor de C, recuperada no extrato da amostra fumigada e a recuperada na amostra não fumigada e kc - fator de correção.

4.9 Quociente microbiano (qMic)

O quociente microbiano (qMic) é obtido por meio da relação entre o CBM e o conteúdo matéria orgânica total no solo. O qMic segundo Wardle; Hungria (1994), é expresso em porcentagem (%), e dado pela equação:

$$qMic = \frac{(BMS/COT)}{10}$$

Em que:

qMic – quociente microbiano do solo (%);

BMS – carbono da biomassa microbiana do solo (mg de C kg⁻¹ de solo);

COT – carbono orgânico total do solo (g kg⁻¹ solo).

4.10 Relação entre carbono orgânico associado ao mineral/ biomassa microbiana do solo

Essa relação é obtida através da divisão entre o carbono orgânico associado ao mineral (COAM) pela biomassa microbiana do solo (BMS), sendo expresso em %.

$$\frac{COAM}{BMS} = \frac{\text{Carbono orgânico associado ao mineral}}{\text{Biomassa microbiana do solo}} * 100$$

4.11 Qualidade da biomassa

Foi avaliado a influência da qualidade da biomassa sobre as frações de matéria orgânica, atributos químicos, quociente microbiano e relação COAM/BMS, de acordo com a relação C/N das leguminosas e a presença do capim Mombaça utilizadas no experimento desse estudo, conforme mostra a Tabela 1. Adaptada de Souza (2013).

Tabela 1 – Relação C/N da combinação de biomassas, com e sem a presença do capim Mombaça, aplicadas na área experimental Universidade Estadual do Maranhão.

| Combinação de biomassas aplicadas | COM CAPIM | SEM CAPIM |
|-----------------------------------|-------------|-------------|
| | Relação C:N | Relação C:N |
| Sombreiro+Leucena (S+L) | 17,3 | 14,9 |
| Acácia+Leucena (A+L) | 19,01 | 17,4 |
| Leucena+Gliricídia (L+G) | 15,6 | 12,4 |
| Acácia+Gliricídia (A+G) | 19,6 | 18,4 |
| Sombreiro+Gliricídia (S+G) | 17,9 | 15,9 |

Cálculo da relação C/N: A relação C/N foi calculada de acordo com a soma referente as leguminosas presentes no experimento, baseado na presença do capim Mombaça. Nas combinações com capim, as três relações C/N foram divididas por 3 enquanto sem capim, as relações foram divididas por 2.

4.12 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Para as análises estatísticas foi utilizado o software R, versão x64 4.0.2.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Carbono orgânico total (COT)

Na camada de 0-10 cm do carbono orgânico total (Figura 2), foi verificada diferenças significativas ($p < 0,05$) nas combinações de leguminosas com a presença do capim Mombaça. A combinação de Sombreiro+Gliricidia apresentou o maior conteúdo de COT, no valor de $14,5 \text{ g kg}^{-1}$. Com isso, de acordo com Carmo et al., (2012), a Gliricidia pode ter influenciado para esse valor de COT nessa combinação, devido a maior influência dos seus resíduos vegetais distribuídos em superfície associada a menor taxa de decomposição do sombreiro, além de maior concentração de raízes na camada de 0-10 cm, principalmente de gramíneas. O carbono orgânico total do solo (COT) é um parâmetro-chave que envolve a qualidade do solo, o fornecimento de nutrientes, o ciclo biogeoquímico e as mudanças climáticas globais (GALLOWAY et al., 2008; BAI et al., 2017; JIA et al., 2017).

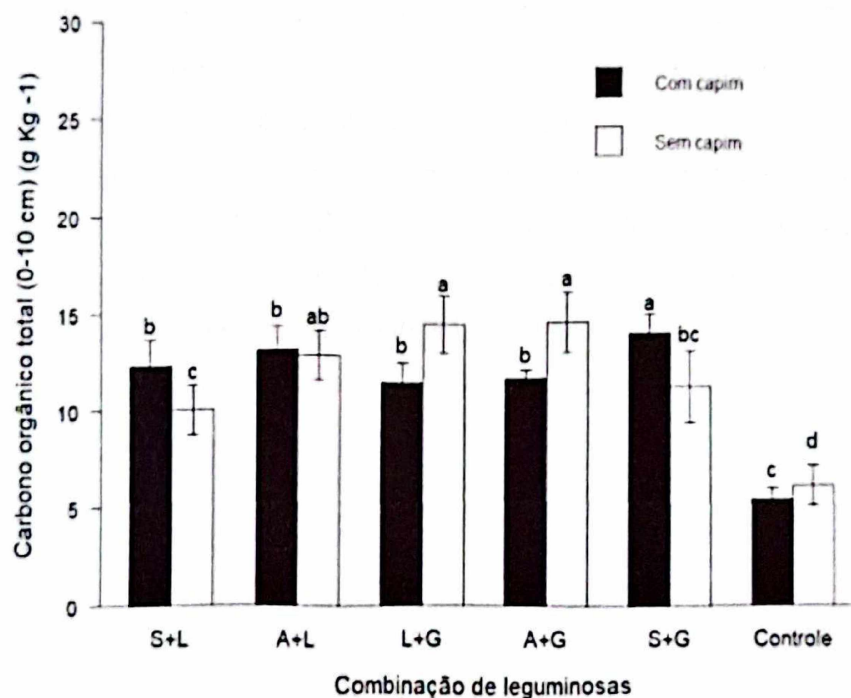


Figura 2 Valores de carbono orgânico total na profundidade de 0-10 cm, de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça, instalado na Universidade Estadual do Maranhão, em São Luis-MA. S+L = Sombreiro+Leucena; A+L= Acácia+Leucena; L+G= Leucena+Gliricidia; A+G = Acácia+Gliricidia; S+G= Sombreiro+Gliricidia. Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey.

Com relação as combinações de leguminosas sem a presença do capim Mombaça, houve diferenças significativas ($p < 0,05$), o carbono orgânico total foi considerado alto na maioria das combinações, sendo as de L+G e A+G com os valores mais superiores, de $14,8 \text{ g kg}^{-1}$. A provável explicação para na combinação de L+G ter apresentado esse valor se deve à baixa relação C:N, fazendo com que os resíduos das duas leguminosas de alta qualidade contribuam para que o COT possua uma maior concentração, comparado por exemplo ao controle, que teve uma diminuição de 8,8%, de fato, pela ausência das leguminosas. Segundo Moura et al., (2021), a combinação de leguminosas influencia para que tenha melhoria na qualidade do solo, refletindo no aumento nos valores de COT nas duas situações encontradas nesse trabalho.

Na camada de 10-20 cm do COT (Figura 3), em relação a presença do capim Mombaça apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$) apenas na combinação de S+G comparado a A+G. Os valores encontrados ainda assim foram considerados altos, principalmente nas combinações que tinham a presença de uma leguminosa de alta qualidade, como é o caso da Gliricidia e Leucena, e todos foram maiores do que o controle. De acordo com Lal et al., (2004), no geral, em sistemas que possui associação com leguminosas de grande aporte de resíduos, ocorre acúmulo de grande quantidade de carbono orgânico. Segundo Grutzmacher (2016), os ecossistemas tropicais e subtropicais possuem altas temperaturas e umidade, fato que favorece a rápida ciclagem da matéria orgânica, e por isso, necessitam de um bom suprimento de material orgânico para manter seus estoques de C e atividades agrícolas que diminuam a perturbação do solo e aumentam a oferta e qualidade do material aportado podem ter efeitos benéficos nas taxas de mineralização, de modo a aumentar a estabilização do C.

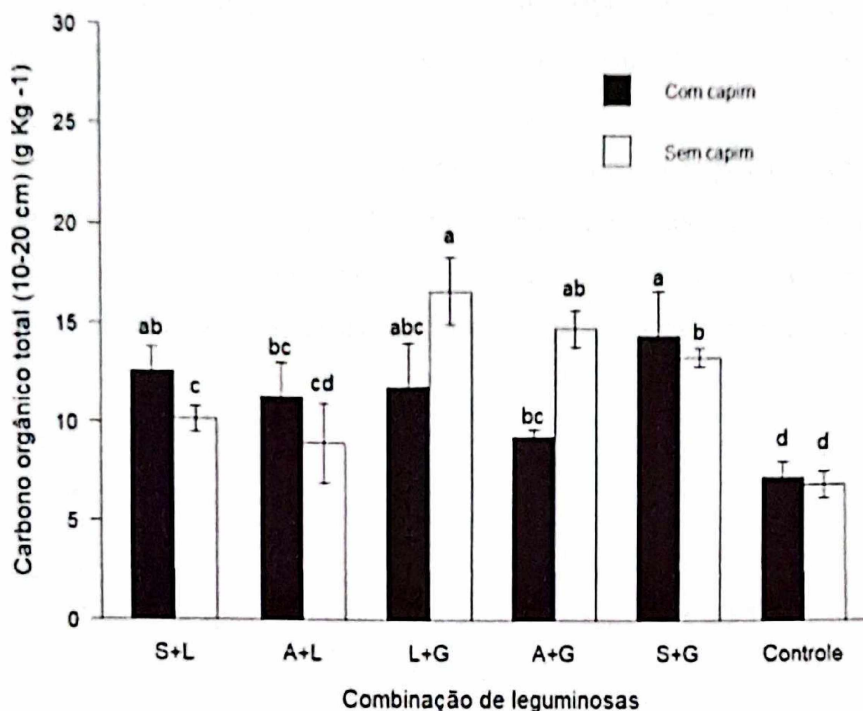


Figura 3 Valores de carbono orgânico total na profundidade de 10-20 cm , de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA. S+L = Sombreiro+Leucena ; A+L= Acácia+Leucena ; L+G= Leucena+Gliricidia ; A+G = Acácia+Gliricidia ; S+G= Sombreiro+Gliricidia . Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey.

Nos resultados encontrados nas combinações sem a presença do capim, foi possível verificar que houve diferenças significativas ($p < 0,05$), maiores que as observadas com o capim Mombaça. O maior valor foi na combinação de Leucena+Gliricidia, com 16 g kg^{-1} , que apresentou um grande acúmulo de COT na profundidade, que pode refletir diretamente no conteúdo de carbono associado ao mineral e carbono orgânico particulado na combinação, interferindo na estabilização da matéria orgânica a partir das frações do carbono.

5.2 Carbono orgânico particulado (COP)

Na camada de 0-10 cm do carbono orgânico particulado com a presença do capim Mombaça (Figura 4), foi possível observar que há diferenças significativas ($p < 0,05$). Comparando as combinações que tiveram o aporte de biomassa com o controle, notou-se que todas apresentaram valores superiores de COP, enquanto o controle teve valores menos expressivos. O carbono orgânico particulado é composto principalmente de partículas fragmentadas, que seria relativamente a serapilheira não decomposta, ele é vulnerável as

perturbações e tem um tempo de rotação mais rápido do que o carbono associado ao mineral (CAM) (LAVALLEE et al., 2020; POEPLAU et al., 2018). Apesar da combinação de L+G possuir alta qualidade de biomassa, foi em L+G com capim mombaça que teve um maior valor de COP, o fato da fração particulada ser sensível a práticas de manejo e em um sistema de aleias em que não há revolvimento do solo, pode ter sido a possível resposta para ter esses altos valores. Segundo Bayer (2002), a fração particulada da MOS é mais sensível às mudanças nas práticas de manejo do solo porque passa por modificações em função das variações no aporte de resíduos vegetais e nas taxas de decomposição que resultam do preparo do solo .

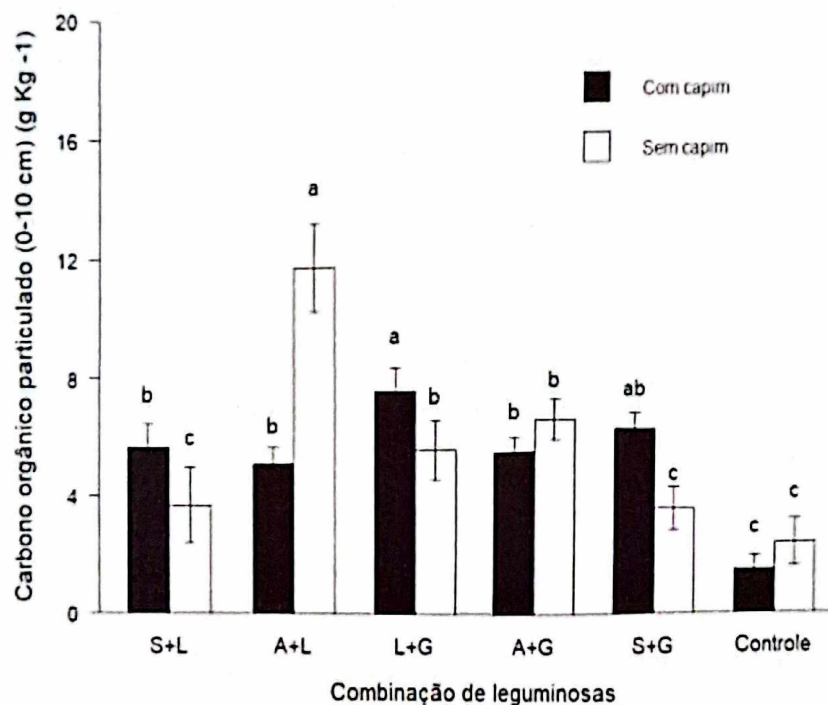


Figura 4 Valores de carbono orgânico particulado na profundidade de 0-10 cm , de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA.S+L = Sombreiro+Leucena ; A+L= Acácia+Leucena ; L+G= Leucena+Gliricídia ; A+G = Acácia+Gliricídia ; S+G= Sombreiro+Gliricídia . Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey.

Há diferenças significativas ($p < 0,05$) na combinação de leguminosas sem a presença de capim Mombaça. A combinação A+L e A+G, apresentaram 11,9 e 7,6 g kg⁻¹, respectivamente, da fração particulada. Essas combinações apresentam uma baixa qualidade de resíduos devido a sua relação C/N, por causa da sua decomposição mais lenta, pode ter

influenciado para os maiores valores de COP nessa profundidade, por seus resíduos vegetais permanecerem mais tempo no solo como cobertura morta.

Segundo Tian et al., (1995), a planta de alta qualidade de resíduos (baixa relação C/N, baixo teor de lignina e polifenol) que se decompõe rapidamente pode ter um efeito nutricional direto como adubo verde e a de baixa qualidade de resíduos (alta relação C/N, alto teor de lignina e polifenol), que se decompõe lentamente, podem ter maiores efeitos na evaporação da água no solo e permanecem por mais tempo na superfície, protegendo-a indiretamente. A provável resposta para o aumento do valor de COP na combinação A+L é que ao combinar resíduos de alta e baixa qualidade, sem a interferência do capim Mombaça, a baixa e alta qualidade das leguminosas dessa combinação podem ter influenciado no estoque de carbono particulado. De fato, os resíduos permaneceram na profundidade de 0-10 cm, o que mostra então, que a interferência de uma combinação de leguminosas podem aumentar o conteúdo de C no solo. De acordo com Lima et al., (2016), os teores de carbono orgânico particulado (COP) sofrem forte influência da incorporação dos resíduos das plantas de cobertura.

Diferenças significativas foram observadas para o carbono particulado na profundidade de 10-20 cm (Figura 5) quando o capim Mombaça está presente ($p < 0,05$). Comparado com a profundidade de 0-10 cm, quanto mais profundo, menores os valores de COP encontrados nas diferentes combinações desse estudo. O maior valor de carbono particulado foi encontrado na combinação de Sombreiro+Leucena, com 7 g kg^{-1} . O carbono orgânico particulado compreende menos matéria orgânica decomposta com uma ampla razão C/N, devido à ausência da influência estabilizadora das superfícies minerais, o COP é altamente lábil e pode responder rapidamente as mudanças no ambiente (GREGORICH et al., 2006; GREGORICH e BEARE, 2008; BALDOCK et al., 2018). A possível resposta aos menores valores de COP na profundidade de 10-20 com o capim pode ser explicada pelo acúmulo de resíduos orgânicos apenas na superfície.

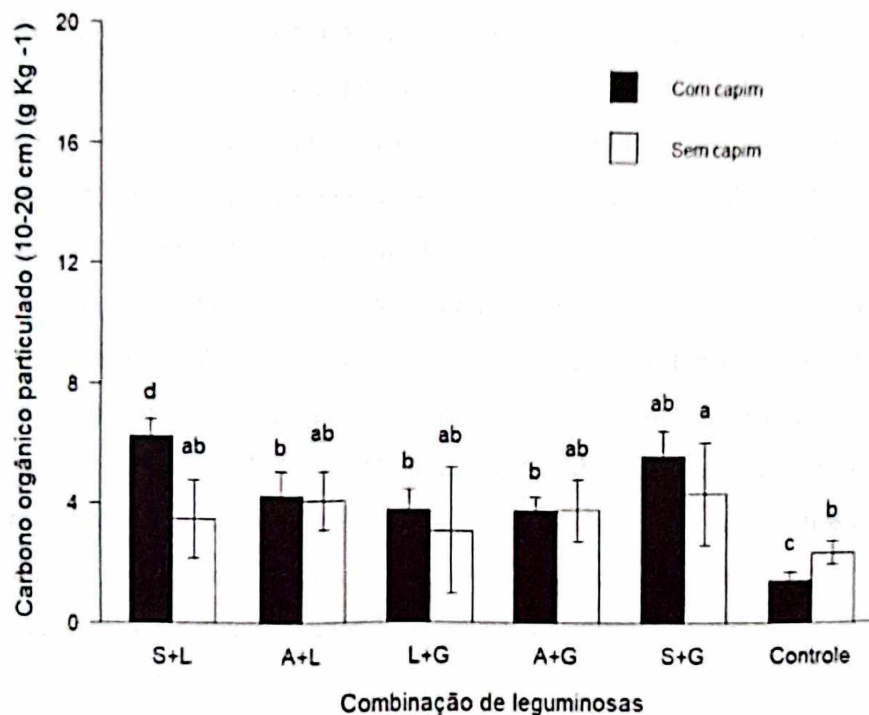


Figura 5 Valores de carbono orgânico particulado na profundidade de 10-20 cm , de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA. S+L = Sombreiro+Leucena ; A+L= Acácia+Leucena ; L+G= Leucena+Gliricidia ; A+G = Acácia+Gliricidia ; S+G= Sombreiro+Gliricidia . Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey.

A fração particulada da matéria orgânica tem sido apontada como bom indicador das práticas de manejo e uso do solo a curto período, pois ela é relacionada com o aporte de resíduos orgânicos e a sua manutenção na superfície do solo (BAYER et al., 2004; ROSSI et al., 2012). Por isso, pode indicar se determinado manejo empregado na área adiciona, mantém e, ou, degrada a matéria orgânica, permitindo alterações no manejo voltado para o aumento da MOS. Ao tratar das combinações de leguminosas sem a presença do capim Mombaça, os resultados obtidos foram ainda menores do que comparado aos com a presença dele. A combinação de L+G foi a que obteve o menor valor entre as combinações de leguminosas , de 3,7 g kg⁻¹ . Ao contrário do que foi visto nas camadas mais superficiais comparando ao controle, o qual não recebe aplicação de biomassa, todos os resultados encontrados foram superiores, o que sugere os ótimos efeitos que são causados pelas combinações de biomassas.

5.3 Carbono orgânico associado ao mineral (COAM)

Na camada de 0-10 cm do carbono orgânico associado ao mineral (Figura 6), na presença do capim Mombaça, houve diferenças significativas ($p < 0,05$). O valor de COAM foi maior na combinação L+G, com 10 g kg^{-1} . Esta é a influência dos resíduos orgânicos das leguminosas de alta qualidade presentes na combinação, além dos valores expressivos encontrados no carbono total nas camadas superficiais em Leucena+Gliricídia. Segundo Sabadin (1984), as gramíneas possuem maior volume de raiz, além de representar a melhor alternativa na associação com leguminosas. A relação C/N mais elevada dessas plantas implicam em maior permanência dos resíduos no solo, favorecendo o estabelecimento da cobertura. Sem a presença do capim Mombaça, houve diferenças significativas ($p < 0,05$), em que o maior valor encontrado de COAM foi na combinação L+G, mostrando que as leguminosas de alta qualidade, neste caso, Leucena e Gliricídia, também interferiram com seus resíduos vegetais no conteúdo de carbono associado ao mineral na superfície.

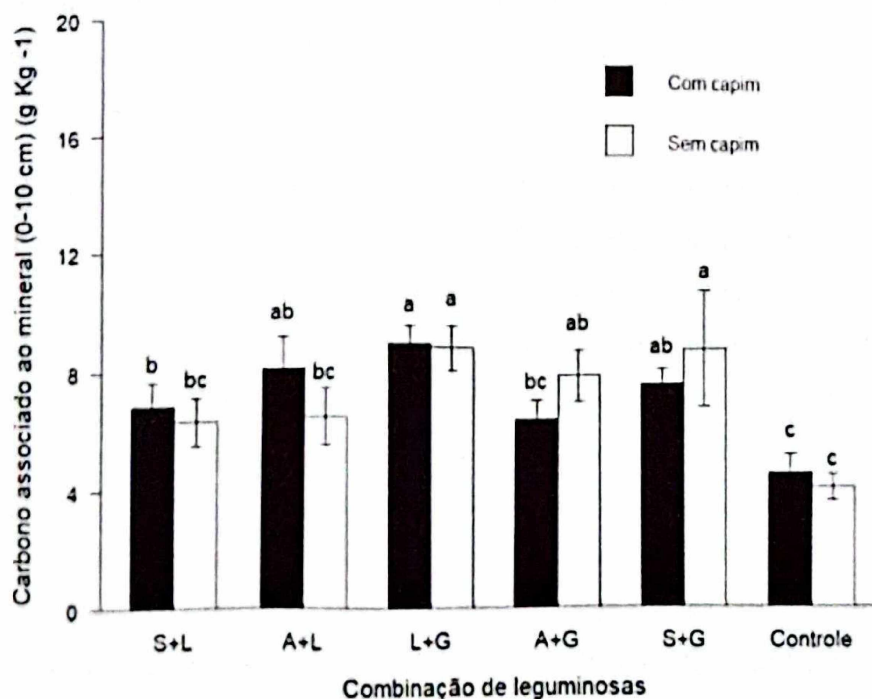


Figura 6 Valores de carbono orgânico associado ao mineral na profundidade de 0-10 cm, de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça, instalado na Universidade Estadual do Maranhão, em São Luís-MA. S+L = Sombreiro+Leucena; A+L= Acácia+Leucena; L+G= Leucena+Gliricídia; A+G = Acácia+Gliricídia; S+G= Sombreiro+Gliricídia. Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey.

Ademais, houve altos valores de COAM tanto na presença do capim quanto na ausência na combinação S + G. É provável que a combinação das leguminosas de alta com baixa qualidade possa ter interferido na razão anabolismo/catabolismo microbiano. A presença de uma leguminosa de alta qualidade, como é o caso da Gliricídia, possibilita que essa razão permaneça alta e conseqüentemente o COAM fique maior, devido a menor quantidade de CO₂ que são produzidos pelo número de serapilheira metabolizada, o que influencia na estabilidade da matéria orgânica.

Carbono orgânico associado ao mineral é definido como a fração do carbono orgânico do solo associada a minerais do tamanho de silte a argila, sendo amplamente feito de compostos derivados de microrganismos e de baixo peso molecular (KLEBER et al., 2015). Acredita-se que o COAM seja amplamente C recalcitrante que está intimamente associado à superfície do mineral por meio de uma forte ligação química (ROWLEY et al., 2018; LAVALLEE et al., 2020).

Reicosky et al., (1995) relatam que, o acúmulo de resíduos culturais sobre o solo e de MOS nos primeiros centímetros do solo provocam efeitos importantes em relação à ciclagem de nutrientes, agregação, atividade microbiana, movimento e armazenamento de água, e troca de gases com a atmosfera.

Na camada 10-20 cm do carbono orgânico associado ao mineral (Figura 7), quando se tem a combinação de leguminosas com e sem capim Mombaça, houve diferenças significativas ($p < 0,05$). Tanto na presença do capim Mombaça, quanto na ausência, foi possível observar um acúmulo de COAM em todas as combinações, mas principalmente em L+G. Segundo Ellerbrock e Gerke (2013), a qualidade da biomassa pode ser uma estratégia para aumentar a acumulação e estabilização da MOS. Sabe-se que a intensidade dos mecanismos pelos quais o carbono orgânico pode ser estabilizado biologicamente depende também da estrutura química da biomassa adicionada ao solo. Nesse sentido, a alta qualidade da Leucena e Gliricídia, junto com sua baixa relação C/N, pode provocar um aumento da necromassa microbiana e conseqüentemente uma possível estabilização da MOS nesse sistema, principalmente se interagir com o cátion polivalente (cálcio).

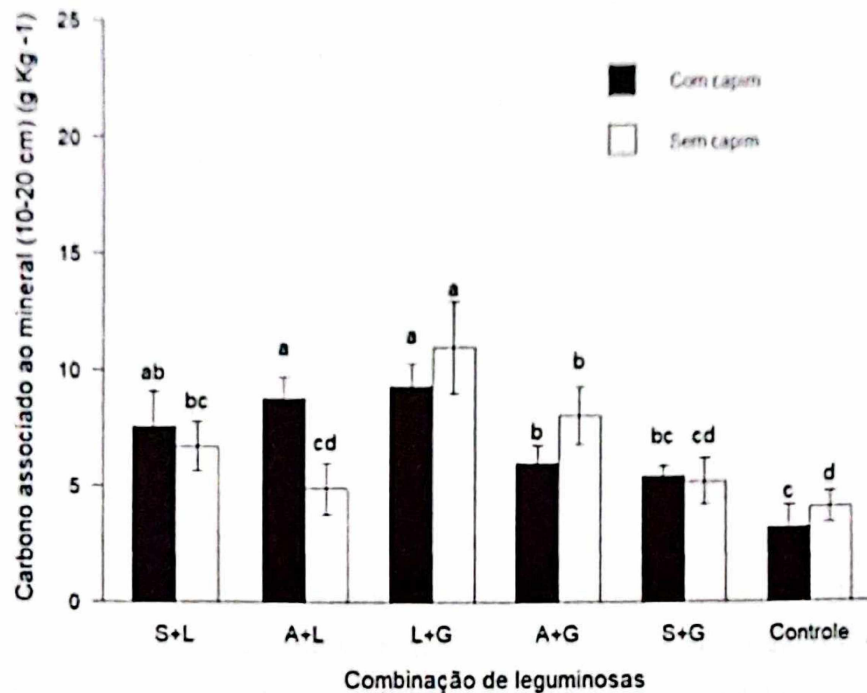


Figura 7 Valores de carbono orgânico associado ao mineral na profundidade de 10-20 cm , de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA. S+L = Sombreiro+Leucena ; A+L= Acácia+Leucena ; L+G= Leucena+Gliricídia ; A+G = Acácia+Gliricídia ; S+G= Sombreiro+Gliricídia . Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey.

De acordo com Moreira; Siqueira (2002), as frações da matéria orgânica estão comumente sendo decompostas e renovadas com o acúmulo de materiais orgânicos no solo, em que o tempo de reciclagem dessas frações varia de poucos meses a vários séculos. Assim, a alta estabilidade química apresenta por determinadas frações orgânicas resultado da recalcitrância das substâncias que as compõe, das transformações que elas sofrem e de mecanismos de proteção contra a decomposição, como a formação de complexos com argilo-minerais.

A alta qualidade da biomassa na combinação L+G e a presença da Leucena na combinação A+L , influencia para que tenha um aumento da necromassa microbiana , com isso, menos CO₂ são produzidos por quantidade de biomassa metabolizadas e os estoques de MOS estáveis devem ser relativamente grandes (PUTTASO et al., 2013). É importante essa estabilização da matéria orgânica em solos do trópico úmido, pois ocorrerá o aumento da fertilidade do solo, melhorando a resistencia à penetração e conseqüentemente, a enraizabilidade do solo, aumenta a retenção de água e nutrientes dos solos, o que provocará uma melhoria na produtividade do sistema. Através da estabilidade da MOS que terá um

aumento do sequestro de carbono do solo no trópico úmido, afinal, com o carbono estocado, vai promover uma menor emissão de gases do efeito estufa para a atmosfera e com isso, espera-se que a eficiência do uso do carbono desse sistema seja alta, a partir da estabilização dessa MOS. Segundo Luo et al.,(2020), a eficiência do uso do carbono (EUC) não é apenas um componente-chave no ciclo do carbono da vegetação, medindo a eficiência de troca do dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera para a biomassa vegetal, mas também revela a alocação da vegetação para o armazenamento e consumo de carbono.

5.4 Quociente microbiano (qMic)

Segundo Duarte et al., 2014, o quociente microbiano (qMic) é expresso através da razão entre as variáveis CBM e COT. Ao se tratar do quociente microbiano na profundidade de 0-10 cm (Figura 8), na presença do capim Mombaça, houve diferenças significativas ($p < 0,05$). De fato, existe um valor de referência para indicar um bom nível da atividade do qMic, de 2,2%. Os valores encontrados foram considerados superiores e conseqüentemente bons, mas, comparando-se a atividade do quociente na combinação de L+G, com valor de 7%, as demais combinações tiveram uma qualidade nutricional inferior de matéria orgânica, com uma baixa atividade do quociente microbiano. Logo, os baixos valores nas outras combinações podem ser reflexo da quantidade de carbono orgânico do solo imobilizado pela biomassa microbiana. Além disso, Pôrto et al.(2009), destaca que, apesar de o qMic estar sendo mencionado como um importante indicador da qualidade da MOS, pode refletir também variações de matéria orgânica no solo, a eficiência de conversão de C orgânico em C microbiano, perdas de C do solo e estabilização de C orgânico pelas suas frações minerais.

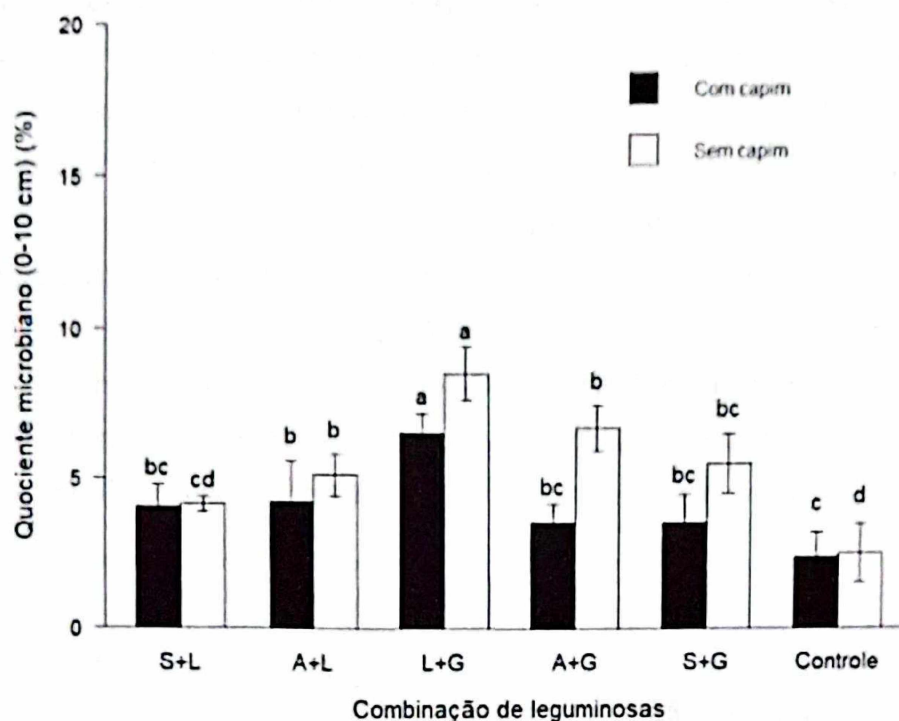


Figura 8 Valores do quociente microbiano (qMic) na profundidade de 0-10 cm , de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA. S+L = Sombreiro+Leucena ; A+L= Acácia+Leucena ; L+G= Leucena+Gliricidia ; A+G = Acácia+Gliricidia ; S+G= Sombreiro+Gliricidia . Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey.

Em relação as combinações sem a presença do capim Mombaça, foi possível observar diferenças significativas ($p < 0,05$), em que as combinações tiveram resultados superiores ao valor de referência (2,2%) e, foi na combinação de Leucena+Gliricidia (L+G) que se notou a maior atividade do quociente microbiano, no valor de 9%, o mesmo ocorreu com a presença do capim. Comparando as outras combinações, os valores não tiveram discrepâncias com base em L+G, mostrando que a ausência do capim permitiu que encontrasse uma maior qualidade nutricional da MOS em todas as combinações. Acredita-se que os altos valores desse quociente sem o capim são devido ao aporte das leguminosas e sua taxa de mineralização ser maior do que a das gramíneas, considerando-se como a melhor alternativa para aumentar a matéria orgânica ao solo, promovendo uma boa atividade da comunidade microbiana ali presente. Segundo Navroski et al.,(2011), a presença de plantas de cobertura como leguminosas, representam uma aplicação significativa de carbono orgânico, que acaba por estimular a microbiota do solo.

Na camada de 10-20 cm do quociente microbiano (Figura 9), com a presença do capim Mombaça, teve diferenças significativas ($p < 0,05$). Na combinação de L+G e A+L verificou-se maiores valores de qMic, com 9% e 7%, respectivamente. De acordo com Anderson & Domsch (1989), um maior qMic representa maior ciclagem de nutrientes e, portanto, menor acúmulo de carbono. Logo, os valores expressivos nesta camada de quociente microbiano são devido a maior quantidade de COT, sendo convertido para carbono da biomassa viva, assim, não permanece acumulado nas combinações, o que provoca um alto qMic e presença de uma matéria orgânica de melhor qualidade. Segundo Cunha et al. (2016), quanto maior o quociente microbiano, mais eficiente o solo é na imobilização do carbono orgânico. Além disso, de acordo com Mercante (2001), a relação entre carbono microbiano e carbono orgânico (qMic) pode apontar uma disponibilidade da matéria orgânica para os microrganismos.

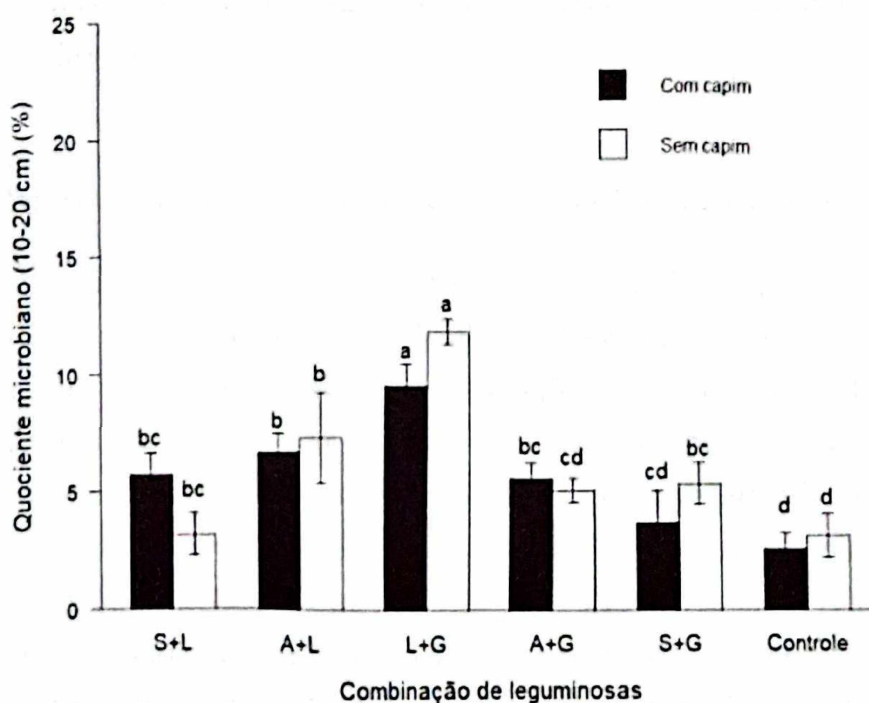


Figura 9 Valores do quociente microbiano (qMic) na profundidade de 10-20 cm, de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça, instalado na Universidade Estadual do Maranhão, em São Luis-MA. S+L = Sombreiro+Leucena; A+L= Acácia+Leucena; L+G= Leucena+Glicírdia; A+G = Acácia+Glicírdia; S+G= Sombreiro+Glicírdia. Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey.

Acredita-se que o quociente microbiano (qMic) é sensível aos efeitos ambientais e antropogênicos sobre a comunidade microbiana do solo, podendo-se constituir um indicador também das perturbações dos ecossistemas (D'ANDRÉA et al., 2004; HARRIS, 2003). Nesse

sentido, aponta-se que os menores valores desse quociente podem estar atrelados também a qualidade da matéria orgânica, podendo estar baixa.

Em relação ao quociente microbiano na ausência do capim Mombaça, também houve diferenças significativas ($p < 0,05$). Os maiores valores encontrados foram nas combinações de Leucena+Gliricidia (12%) e Acacia+Leucena (7,4%), mostrando que a qualidade da matéria orgânica desse solo se manteve com a profundidade de 10-20 cm, principalmente nessas combinações. Além disso, altos valores de q_{Mic} indicam que o carbono está sendo estocado, consequentemente, aumentando a eficiência do uso do carbono (EUC) nesse solo. De acordo com Manzoni et al., (2012) e Spohn et al., (2016b), uma EUC mais elevada reflete um crescimento microbiano mais eficiente e menos emissão de C na atmosfera por meio da respiração. Enquanto Sombreiro+Leucena notou-se o menor valor de q_{Mic} (3%), porém, todas as combinações de leguminosas foram maiores do que o controle. Segundo Soares (2017), esses baixos valores de quociente microbiano indicam que não está sendo incorporado o carbono na microbiota do solo.

5.5 Relação carbono orgânico associado ao mineral/ carbono da biomassa microbiana

A respeito da relação entre carbono orgânico associado ao mineral (COAM) pelo carbono da biomassa microbiana (CBM) (Tabela 2), trata-se sobre quanto da biomassa viva foi transformada em carbono estabilizado. Nesse sentido, houve diferenças significativas ($p < 0,05$) na profundidade de 0-10 cm, e foi possível observar que a combinação de L+G+M e L+G tiveram o melhor desempenho, com 2,42 e 2,88%, respectivamente, de carbono da biomassa viva alocado para a estabilização da matéria orgânica do solo. Isso significa que nessas combinações, notou-se uma boa quantidade de CBM que está atribuído principalmente a biomassa de alta qualidade que foi inserida no sistema, no caso, as leguminosas Leucena e Gliricidia. Segundo Aponte et al., (2014); Leloup et al., (2018) e Santonja et al., (2018), a composição e função da comunidade microbiana variam em relação à qualidade da serapilheira, por sua vez dependendo da espécie vegetal. Além disso, atrelado ao cálcio acumulado, que se apresentou maior nessas combinações, também influencia no processo para estabilização da MOS.

Tabela 2 – Valores da relação entre carbono orgânico associado ao mineral (COAM) / carbono da biomassa microbiiana (CBM) nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça, instalado na Universidade Estadual do Maranhão, em São Luís-MA.

| Combinação de biomassas aplicadas | Profundidade | Profundidade |
|-----------------------------------|--------------|--------------|
| | 0-10 cm | 10-20 cm |
| | COAM/CBM | COAM/CBM |
| | % | % |
| L+G+M | 2,42 a | 1,63 b |
| L+G | 2,88 a | 3,43 a |
| S+G+M | 1,8 b | 1,06 b |
| S+G | 1,48 b | 1,7 b |
| S+L+M | 1,42 b | 1,15 b |
| S+L | 2,16 b | 2,46 b |
| A+G+M | 1,81 b | 1,23 b |
| A+G | 0,67 b | 2,66 a |
| A+L+M | 2,4 b | 1,46 b |
| A+L | 1,08 b | 0,57 b |
| C+M | 1,05 c | 0,91 c |
| C | 0,44 c | 0,34 c |
| CV(%) | 48,2 | 52 |

Abreviações: L+G+M=Leucena+Gliricidia+Mombaça; L+G=Leucena+Gliricidia; S+G+M=Sombreiro+Gliricidia+Mombaça; S+G= Sombreiro+Gliricidia ; S+L+M= Sombreiro+Leucena+Mombaça ; S+L= Sombreiro+Leucena ; A+G+M= Acácia+Gliricidia+Mombaça ; A+G= Acácia+Gliricidia ; A+L+M= Acácia+Leucena+Mombaça ; A+L= Acácia+Leucena ; C+M = Controle com Mombaça ; C= Controle sem Mombaça. Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey.

Na profundidade de 10-20 cm, se observou diferenças significativas ($p < 0,05$) apenas nas combinações sem a presença do capim Mombaça. Na combinação L+G ocorreu um melhor desempenho desta relação, com 3,43 %, um valor alto para a camada, mostrando que se acumulou CBM em profundidade, juntamente com COAM. É notório que a combinação de leguminosas de alta qualidade se destaca em relação a presença de carbono da biomassa viva, a qual para que ocorra uma provável estabilização da MOS. Ademais, espera-se que a eficiência do uso do carbono seja alta, já que com a estabilização, o carbono permanece estocado no solo, não liberando CO_2 para a atmosfera.

Embora as plantas sejam os principais impulsionadores da absorção de carbono (C) da atmosfera, os microrganismos têm contrastantes papéis no controle de fluxos de C no solo, promovendo a liberação de C para a atmosfera através de suas atividades catabólicas e estabilizando o C pela formação de matéria orgânica estabilizada no solo (SCHIMEL e SCHAEFFER, 2012).

5.6 Atributos químicos

Quanto a presença do cálcio (Ca) e matéria orgânica (Tabela 3), foi encontrado diferenças significativas ($p < 0,05$) no Ca tanto na profundidade de 0-10 cm quanto na de 10-20 cm. Na profundidade de 0-10 cm, foi na combinação de L+G que foi observado uma maior concentração do cálcio, no valor de $61,5 \text{ mmol m}^{-3}$. Acredita-se que devido a qualidade da biomassa aplicada nessa combinação (L+G), possa ter ajudado para que o Ca aumentasse, o que conseqüentemente pode influenciar na estabilização da matéria orgânica do solo. De acordo com Whittinghill e Hobbie (2012), o Ca interage com grupos funcionais da matéria orgânica do solo por meio da formação de pontes catiônicas o que levou à relativa estabilização e acúmulo de MOS.

Tabela 3 – Atributos químicos do solo (cálcio -Ca, matéria orgânica -MO e cálcio acumulado no solo - CaAS) nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, de um experimento em sistema de alelas com e sem capim Mombaça, instalado na Universidade Estadual do Maranhão, em São Luis-MA.

| Combinação de biomassas aplicadas | Profundidade 0-10 cm | | | Profundidade 10-20 cm | | |
|-----------------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|
| | Ca | MO | CaAS | Ca | MO | CaAS |
| | mmole m^{-3} | g dm^{-3} | Kg/ha ¹ | mmole m^{-3} | g dm^{-3} | Kg/ha ¹ |
| L+G+M | 61,1 a | 23,9 a | 497 b | 60,1 a | 24,8 a | 534 b |
| L+G | 61,5 a | 23,3 a | 579 a | 59,5 a | 28,6 a | 669 a |
| S+G+M | 60 b | 20 b | 453 b | 59,5 a | 15,9 c | 509 b |
| S+G | 58,9 b | 18,4 bc | 465 b | 56,3 b | 22,9 bc | 474 b |
| S+L+M | 57,2 b | 22,8 a | 340 b | 51 b | 21,6 ab | 166 c |
| S+L | 59,8 b | 23 a | 512 b | 55,1 b | 17,5 cd | 424 b |
| A+G+M | 59,9 b | 20 b | 448 b | 56,8 b | 20,3 abc | 400 b |
| A+G | 58,1 b | 18,9 bc | 442 b | 57,4 b | 25,4 ab | 517 b |
| A+L+M | 61,4 a | 23,7 a | 509 b | 60 a | 19,5 abc | 529 b |
| A+L | 61,1 a | 19 b | 555 a | 61,2 a | 17,1 d | 601 a |
| C+M | 48,7 c | 15,6 c | 68 c | 46,8 c | 15,9 bc | 93 c |
| C | 47 c | 16,8 c | - | 44,5 c | 15,4 d | - |
| CV(%) | 6,99 | 4,38 | 6,01 | 12,21 | 11,53 | 9,20 |

Abreviações: L+G+M=Leucena+Gliricidia+Mombaça; L+G=Leucena+Gliricidia; S+G+M=Sombreiro+Gliricidia+Mombaça; S+G= Sombreiro+Gliricidia; S+L+M= Sombreiro+Leucena+Mombaça; S+L= Sombreiro+Leucena; A+G+M= Acácia+Gliricidia+Mombaça; A+G= Acácia+Gliricidia; A+L+M= Acácia+Leucena+Mombaça; A+L= Acácia+Leucena; C+M= Controle com Mombaça; C= Controle sem Mombaça. Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey.

Na profundidade de 10-20 cm, o teor de cálcio na combinação Acácia + Leucena foi maior, de 61,2 mmol m⁻³. A combinação de uma leguminosa de alta qualidade com uma de baixa pode ter ajudado para que o nível de cálcio permanecesse alto. É preciso que sejam feitas estratégias de manejo para aumentar cátions polivalentes, como cálcio, em todo o perfil do solo pois são necessários para consequentemente manter o conteúdo do MOS em solos tropicais, para atingir um nível adequado de MOS (por aumento da fração estabilizada) e alta reciclagem e retenção de Ca (CARMEIS FILHO et al., 2017).

Em relação a matéria orgânica (MO), foi possível observar que teve diferenças significativas ($p < 0,05$) na profundidade de 0-10 cm. Como o que foi observado no cálcio, foram as combinações de L+G+M (Leucena+Gliricidia+Mombaça), L+G (Leucena+Gliricidia) e A+L+M (Acácia+Leucena+Mombaça) que tiveram os maiores valores de MO, com 23,9, 23,3 e 23,7 g dm³, respectivamente. Notou-se que nessa profundidade, o capim Mombaça nessas combinações não diminuiu a quantidade encontrada de MO, isso pode ser segundo Pereira (2006), devido a capacidade das gramíneas fornecerem matéria orgânica ao solo, devido a sua grande capacidade de produção de biomassa.

Já na profundidade de 10-20 cm, também houve diferenças significativas ($p < 0,05$). Foi visto que a combinação de Leucena+Gliricidia teve maior presença de matéria orgânica no solo, com 28,6 g dm³. Esse alto conteúdo pode ser um reflexo das leguminosas de alta qualidade e baixa relação C/N que se encontram em L+G, permitindo que ocorra mais entrada e menos saída de MO, fazendo com que esse sistema ofereça uma relação de ganho, pois consequentemente, essa matéria orgânica também vai ser estabilizada com a ajuda do cátion polivalente (cálcio).

Em relação ao acúmulo de cálcio no solo (CaAS) (Tabela 2), ocorreu diferenças significativas ($p < 0,05$) tanto na camada de 0-10 cm como na de 10-20 cm. Como se pode verificar, a combinação de Leucena+Gliricidia teve um maior acúmulo de cátion polivalente (cálcio) tanto na profundidade de 0-10 cm quanto na de 10-20 cm, com 579 e 669 kg/ha, respectivamente. Isso indica a viabilidade no agroecossistema, nesse sentido, pode-se dizer que o cálcio ficou retido no sistema com o uso de biomassas de alta qualidade, principalmente em maior profundidade, em que se pode ver que ocorre a reciclagem do Ca durante o experimento, que é combinada com a biomassa de alta qualidade promovendo a estabilização MOS. Segundo Ziglio, Miyazawa e Pavan (1999), com a presença dos ligantes orgânicos vindo dos vegetais, ocorre uma ação na redução da mobilidade do cálcio no solo.

6 CONCLUSÃO

Os resultados desse estudo confirmam a nossa hipótese de que biomassa de maior qualidade favorece o aumento da fração da MOS associada ao mineral. As variações das frações da matéria orgânica, do quociente microbiano e da relação carbono orgânico associado ao mineral/biomassa microbiana do solo, causaram um aumento da fração estável da MOS. Esses resultados indicam que o uso da biomassa de alta qualidade é uma estratégia adequada para aumentar o sequestro de carbono no solo, que pode contribuir decisivamente para diminuir a liberação de CO₂ para a atmosfera e mudar a aptidão das terras.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, A. D. C. F.; BICUDO, S. J.; SOBRINHO, J. R. S. C.; MARTINS, A. L. S.; COELHO, K. P.; DE MOURA, E. G. Nutrient recycling and physical indicators of an alley cropping system in a sandy loam soil in the pre-Amazon region of Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 86, n. 2, p. 189-198, 2010.

AKINNIFESI, F.K.; AJAYI, O.C.; SILESHI, G.; CHIRWA, P.W.; CHIANU, J. ' Fertilizer trees for sustainable food security in the maize-based production systems of East and Southern Africa. A review ', *Agronomy for Sustainable Development*, v. 30, p. 615-629, 2010. [DOI:10.1051/agro/2009058]

ALMAGRO, M.; DE VENTE, J.; BOIX-FAYOS, C.; GARCÍA-FRANCO, N.; MELGARES DE AGUILAR, J.; GONZÁLEZ, D.; SOLÉ-BENET, A.; MARTÍNEZ-MENA, M. Sustainable land management practices as providers of several ecosystem services under rainfed Mediterranean agroecosystems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 21, p. 1029-1043, 2016.

ALMAGRO, M.; GARCIA-FRANCO, N.; MARTÍNEZ-MENA, M. The potential of reducing tillage frequency and incorporating plant residues as a strategy for climate change mitigation in semiarid Mediterranean agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 246, p. 210-220, 2017.

ALVES, M. S. D. S. *Uso de indicadores biológicos para avaliação da qualidade do solo sob cultivo de culturas agroenergéticas em Pedro Afonso, Tocantins*, 2014, 81 f. Dissertação de mestrado-Universidade Federal de Tocantins, Palmas, 2014.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil biology and biochemistry*, v. 21, n. 4, p. 471-479, 1989.

APONTE, C.; MATÍAS, L.; GONZALEZ-RODRÍGUEZ, V.; CASTRO, J.; GARCÍA, L.V.; VILLAR, R.; MARANÓN, T. Soil nutrients and microbial biomass in three contrasting Mediterranean forests. *Plant and Soil*, v. 380, p. 57-72, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2061-5>.

ARAÚJO, T. D. S.; GALLO, A. D. S.; ARAUJO, F. D. S.; DOS SANTOS, L. C.; GUIMARÃES, N. D. F.; DA SILVA, R. F. Biomass and microbial activity in soil cultivated with maize intercropped with soil cover legumes. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 42, n. 2, p. 51-60, 2019.

ASSUNÇÃO, S. A. *Efeitos nas frações da matéria orgânica do solo pela aplicação de Nfertilizante em cana crua com deposição da palhada*, 2016, 58 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) - Universidade Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2016.

BAI, J.; JIA, J.; HUANG, C.; WANG, Q.; WANG, W.; ZHANG, G.; LIU, X. Selective uptake of nitrogen by Suaeda salsa under drought and salt stresses and nitrogen fertilization using ¹⁵N. *Ecological Engineering*, v. 102, p. 542-545, 2017.

- BALDOCK, J. A.; BEARE, M. H.; CURTIN, D.; HAWKE, B. Stocks, composition and vulnerability to loss of soil organic carbon predicted using mid-infrared spectroscopy. *Soil Research*, v. 56, n. 5, p. 468-480, 2018.
- BALESDENT, J.; BALABANE, M. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 28, n. 9, p. 1261-1263, 1996.
- BATJES, N. H.; SOMBROEK, W. G. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. *Global change biology*, v. 3, n. 2, p. 161-173, 1997.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 39, n. 7, p. 677-683, 2004.
- BERTALOT, M. J. A.; GUERRINI, I. A.; MENDOZA, E.; PINTO, M. S. V. Desempenho da cultura do milho (*Zea mays* L.) em sucessão com aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb.) sob manejos agroflorestal e tradicional. *Revista Árvore*, v. 34, p. 597-608, 2010.
- BIELUCZYK, W.; PEREIRA, M. G.; GUARESCHI, R. F.; BONETTI, J. A.; FREÓ, V. A.; SILVA NETO, E. C. Granulometric and oxidizable carbon fractions of soil organic matter in crop-livestock integration systems. *Semina: Ciências Agrárias*, v.38, n.2, p.607- 622, 2017.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, v.56, p.777- 783, 1992.
- CANELLAS, L. P.; ESPINDOLA, J. A. A.; REZENDE, C. E.; CAMARGO, P. B. D.; ZANDONADI, D. B.; RUMJANEK, V. M.; BRAZ-FILHO, R. Organic matter quality in a soil cultivated with perennial herbaceous legumes. *Scientia Agricola*, v. 61, n. 1, p. 53-61, 2004.
- CARDINAEL, R.; CHEVALLIER, T.; BARTHÈS, B. G.; SABY, N. P.; PARENT, T.; DUPRAZ, C.; CHENU, C. Impact of alley cropping agroforestry on stocks, forms and spatial distribution of soil organic carbon—A case study in a Mediterranean context. *Geoderma*, v. 259, p. 288-299, 2015.
- CARMEIS FILHO, A. C. A.; PENN, C.J.; CRUSCIOL, C. A.C.; CALONEGO, J.C. Lime and phosphogypsum impacts on soil organic matter pools in a tropical oxisol under long-term no-till conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 23, p. 241:11–23, 2017.
- CARMO, F. F.; FIGUEIREDO, C.C.; RAMOS, M. L. G.; VIVALDI, L. J.; ARAÚJO L.G. Frações granulométricas da matéria orgânica em Latossolo sob plantio direto com gramíneas. *Bioscience Journal*, v. 28, p.420-31, 2012
- CHENU, C.; ANGERS, D. A.; BARRÉ, P.; DERRIEN, D.; ARROUAYS, D.; BALESDENT, J. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research*, v. 188, p. 41-52, 2019.

COTRUFO, M.F.; RANALLI, M.G.; HADDIX, M.L.; SIX, J.; LUGATO, E. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience*, v. 12, p.989–994, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>.

CUNHA, JOÃO R.; LEITE, LUIZ F. C.; SOUZA, DJALMA J. A. T.; FILHO, CARLOS H. A. M. Biomassa microbiana e atividade enzimática de um latossolo em diferentes sistemas de manejo do cerrado Piauiense. *Jornada de Iniciação Científica da Embrapa Meio-Norte*, v. 2, p. 64-68, 2016.

CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; CANELAS, L. P.; RIBEIRO, L. P.; BENITES, V. M.; SANTOS, G. A. Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (Terra Preta de Índio) in the Brazilian Amazon basin. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, p.85-93. 2009.

DA SILVA, D. M. S. **PARÂMETROS DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DO JILÓ EM SISTEMAS DE CULTIVO EM ALEIAS**, 2020, 51 f. Dissertação (Mestrado em Agroecologia) – Universidade Estadual de Roraima, Boa Vista, 2020.

D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; GUILHERME, L. R. G. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v. 39, p. 179-186, 2004.

DE BONA, F.D. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas irrigados por aspersão sob plantio direto e preparo convencional**, 2005, 150 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P. & KÖGELKNABNER, I. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilization. *Plant Soil*, v.268, p.319-328, 2005.

DUARTE, I. B.; GALLO, A.S.; GOMES, M.S.; GUIMARÃES, N.F.; ROCHA, D. P.; SILVA, R. F. Plantas de cobertura e seus efeitos na biomassa microbiana do solo. *Acta Iguazu*, v.3, n.2, p. 150-165, 2014.

ELLERBROCK, R. H., GERKE, H. H. Explaining soil organic matter composition based on associations between OM and polyvalent cations. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 181, p. 721-736, 2018. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800093>

ELLERBROCK, R. H.; GERKE, H. H. Characterization of organic matter composition of soil and flow path surfaces based on physicochemical principles—A review. *Advances in Agronomy*, v. 121, p. 117–177, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro. Embrapa Solos, v.2, p. 306, 2006.

FIGUEIREDO, C. C.; RESCK, D. V. S.; CARNEIRO, M. A. C.; RAMOS, M. L. G.; SÁ, J. C. M. Stratification ratio of organic matter pools influenced by management systems in a

weathered Oxisol from a tropical agro-ecoregion in Brazil. *Soil Research*, v. 51, n. 2, p. 133-141, 2013.

FOLEY, J. A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K. A.; CASSIDY, E. S.; GERBER, J. S.; JOHNSTON, M.; ZAKS, D. P. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, v. 478, p. 337-342, 2011.

FOLEY, J.A.; DEFRIES, R.; ASNER, G.P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S.R.; CHAPIN, F.S.; COE, M.T.; DAILY, G.C.; GIBBS, H.K.; HELKOWSKI, J.H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E.A.; KUCHARIK, C.J.; MONFREDA, C.; PATZ, J.A.; PRENTICE, I.C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P.K. Global consequences of land use. *Science*, v. 309, p. 570-574, 2005.

GALLOWAY, J. N.; TOWNSEND, A. R.; ERISMAN, J. W.; BEKUNDA, M.; CAI, Z.; FRENEY, J. R.; SUTTON, M. A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, v. 320, n. 5878, p. 889-892, 2008.

GHAFOOR, A.; POEPLAU, C.; KÄTTERER, T. Fate of straw-and root-derived carbon in a Swedish agricultural soil. *Biology and Fertility of Soils*, v. 53, n. 2, p. 257-267, 2017.

GRAYSTON, S. J.; VAUGHAN, D.; JONES, D. Rhizosphere carbon flow in trees, in comparison with annual plants: the importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability. *Applied soil ecology*, v. 5, n. 1, p. 29-56, 1997.

GREGORICH, E. G.; BEARE, M. H.; CARTER, M. R. Physically uncomplexed organic matter. *Soil sampling and methods of analysis*, p. 607-616, 2008.

GREGORICH, E. G.; BEARE, M. H.; MCKIM, U. F.; SKJEMSTAD, J. O. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, v. 70, n. 3, p. 975-985, 2006.

GRUTZMACHER, P. *Estoque de Carbono no solo e emissão de gases de efeito estufa em sistema de produção de milho com uso de lodo de esgoto*, 2016, 120 f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônomo, Campinas, São Paulo, 2016.

HADDIX, M.L.; GREGORICH, E.G.; HELGASON, B.L.; JANZEN, H.; ELLERT, B.H.; FRANCESCA COTRUFO, M. Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil. *Geoderma*, v. 363, p. 114160, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114160>.

HARRIS J. A. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration. *European Journal Soil Science*, v. 54, p. 801-808, 2003.

HENGL, T.; HEUVELINK, G. B.; KEMPEN, B.; LEENAARS, J. G.; WALSH, M. G.; SHEPHERD, K. D.; TONDOH, J. E. Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: Random forests significantly improve current predictions. *PloS one*, v. 10, n. 6, p. e0125814, 2015.

HOWDEN, S.M.; SOUSSANA, J.-F.; TUBIELLO, F.N.; CHHETRI, N.; DUNLOP, M.; MEINKE, H. Adapting agriculture to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 104, p. 19691–19696, 2007.

INSAM, H. Developments in soil microbiology since the mid 1960s. *Geoderma*, v. 100, n. 3, p. 389–402, 2001.

JANZEN, B. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biology Biochemistry*, v.38, p. 419–424, 2006.

JENKINSON, D. S. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. *Soil biochemistry*, v. 5, p. 415–471, 1981.

JERKE C.; SOUSA, D. M. G.; GOEDERT, W.J. Distribuição do carbono orgânico em Latossolo sob manejo da adubação fosfatada em plantio direto no Cerrado. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v.47, n.3, p.442–448, 2012.

JIA, Z.; KUZYAKOV, Y.; MYROLD, D.; TIEDJE, J. Soil organic carbon in a changing world. *Pedosphere*, v. 27, n. 5, p. 789–791, 2017.

KLEBER, M.; EUSTERHUES, K.; KEILUWEIT, M.; MIKUTTA, C.; MIKUTTA, R.; NICO, P. S. Mineral–organic associations: formation, properties, and relevance in soil environments. *Advances in agronomy*, v. 130, p. 1–140, 2015.

KUNDE, R. J.; LIMA, C. L. R.; SILVA, S. D. A.; PILLON, C. N. Frações físicas da matéria orgânica em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.15, n.9, p.1520–1528, 2016.

LAL, R. Enhancing ecosystem services with no-till. *Renewable Agriculture and Food Systems*, v. 28, p. 102–114, 2013.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, v.304, p.1623–1627, 2004

LARSON, W. E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. *Defining soil quality for a sustainable environment*, v. 35, p. 37–51, 1994.

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

LEFF, J. W.; JONES, S. E.; PROBER, S. M.; BARBERÁN, A.; BORER, E. T.; FIRN, J. L.; FIERER, N. Consistent responses of soil microbial communities to elevated nutrient inputs in grasslands across the globe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 112, n. 35, p. 10967–10972, 2015.

LELOUP, J.; BAUDE, M.; NUNAN, N.; MERIGUET, J.; DAJOZ, I.; LE ROUX, X.; RAYNAUD, X. Unravelling the effects of plant species diversity and aboveground litter input on soil bacterial communities. *Geoderma*, v. 317, p. 1–7, 2018.

LI, J.; WANG, G.; MAYES, M. A.; ALLISON, S. D.; FREY, S. D.; SHI, Z.; MELILLO, J. M. Reduced carbon use efficiency and increased microbial turnover with soil warming. *Global change biology*, v. 25, n. 3, p. 900-910, 2019.

LIMA, C. E. P.; FONTENELLE, M. R.; MADEIRA, N. R.; SILVA, J. D.; GUEDES, Í. M. R.; SILVA, L. R. B.; SOARES, D. C. Compartimentos de carbono orgânico em Latossolo cultivado com hortaliças sob diferentes manejos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, p. 378-387, 2016.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; FERREIRA, E. P.; SANTOS, L. L. dos.; BEUTLER, S. J.; FERRAZ JÚNIOR, A. S. de L. Frações oxidáveis do carbono orgânico em argissolo vermelho-amarelo sob sistema de aleias. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, n. 4, p. 867-874, ago. 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000400011>.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; DOS ANJOS, L. H. C.; DA SILVA, E. M. R. Organic fractions and carbon management index of soil under different organic production systems. *Idesia*, v. 29, n. 2, p. 11-19, 2011.

LUO, XIN.; JIA, BINGHAO.; LAI, XIN. Quantitative analysis of the contributions of land use change and CO₂ fertilization to carbon use efficiency on the Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, v. 728, p. 138607, 2020.

MACINNIS-NG, C.; ZEPPEL, M.; WILLIAMS, M.; EAMUS, D. Applying a SPA model to examine the impact of climate change on GPP of open woodlands and the potential for woody thickening. *Ecohydrology*, v. 4, n. 3, p. 379-393, 2011.

MAESTRE, F. T.; DELGADO-BAQUERIZO, M.; JEFFRIES, T. C.; ELDRIDGE, D. J.; OCHOA, V.; GOZALO, B.; SINGH, B. K. Increasing aridity reduces soil microbial diversity and abundance in global drylands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 112, n. 51, p. 15684-15689, 2015.

MANZONI, S.; TAYLOR, P.; RICHTER, A.; PORPORATO, A.; ÅGREN, G. I. Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils. *New Phytologist*, v. 196, n. 1, p. 79-91, 2012.

MARCHIORI JÚNIOR, M.; MELO, W. J. Carbono, carbono da biomassa microbiana e atividade enzimática em um solo sob mata natural, pastagem e cultura do algodoeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, n. 2, p. 257-263, 1999. DOI: 10.1590/S0100-06831999000200009.

MELILLO, J. M.; FREY, S. D.; DEANGELIS, K. M.; WERNER, W. J.; BERNARD, M. J.; BOWLES, F. P.; GRANDY, A. S. Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world. *Science*, v. 358, n. 6359, p. 101-105, 2017.

MERCANTE, F. M. Os microrganismos do solo e a dinâmica da matéria orgânica em sistemas de produção de grãos e pastagem. *Embrapa Agropecuária Oeste-Sistema de Produção (INFOTECA-E)*, 2001.

MIKUTTA, R.; TURNER, S.; SCHIPPERS, A.; GENTSCH, N.; MEYER-STÜVE, S.; CONDRON, L. M.; GUGGENBERGER, G. Microbial and abiotic controls on mineral-

associated organic matter in soil profiles along an ecosystem gradient. *Scientific reports*, v. 9, n. 1, p. 1-9, 2019.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; MALONE, B. P.; WHEELER, I. Digital mapping of soil carbon. *Advances in agronomy*, v. 118, p. 1-47, 2013.

MOREIRA, F. D. S.; SIQUEIRA, J. O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. Editora Ufla, 2002.

MOURA, E. D.; MOURA, N. G.; MARQUES, E. S.; PINHEIRO, K. M.; COSTA SOBRINHO, J. R. S.; AGUIAR, A. C. F. Evaluating chemical and physical quality indicators for a structurally fragile tropical soil. *Soil Use and Management*, v. 25, n. 4, p. 368-375, 2009.

MOURA, E. G.; DE SOUSA, R. M.; CAMPOS, L. S.; CARDOSO-SILVA, A. J.; MOONEY, S. J.; DAS CF AGUIAR, A. Could more efficient utilization of ecosystem services improve soil quality indicators to allow sustainable intensification of Amazonian family farming?. *Ecological Indicators*, v. 127, p. 107723, 2021.

MOURA, E. G.; DE SOUSA, R. M.; CAMPOS, L. S.; CARDOSO-SILVA, A. J.; MOONEY, S. J.; DAS CF AGUIAR, A. Could more efficient utilization of ecosystem services improve soil quality indicators to allow sustainable intensification of Amazonian family farming?. *Ecological Indicators*, v. 127, p. 107723, 2021.

MOURA, E.G.; ALBUQUERQUE, J.M.; AGUIAR, A.C.F. Growth and productivity of corn as affected by mulching and tillage in alley cropping systems. *Scientia Agricola*, v. 65, p. 204- 208, 2008.

MULUMBA, L. N.; LAL, R. Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, v. 98, n. 1, p. 106-111, 2008.

MUNROE, J.W.; ISAAC, M.E. N₂ fixing trees and the transfer of fixed N for sustainable agroforestry: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, v.34, p.417-427, 2014. DOI:10.1007/s13593-013-0190-5.

NAVROSKI, D.; MOREIRA, A.; COLOZZI-FILHO, A.; GRANGE, L. Atributos microbiológicos do solo em diferentes sistemas de manejo no oeste paranaense. *Agrotrópica*, v. 29, p. 127-134, 2017.

NOGUEIRA, N.; OLIVEIRA, O.; MARTINS, C.; BERNARDES, C. Utilização de leguminosas para recuperação de áreas degradadas. *Enciclopédia biosfera*, v. 8, n. 14, 2012.

OLIVEIRA, F. R. A. de.; SOUZA, H. A. de.; CARVALHO, M. A. R. de.; COSTA, M. C. G. Green fertilization with residues of leguminous trees for cultivating maize in degraded soil. *Revista Caatinga*, Mossoró, v. 31, n. 4, p. 798 –807, out. –dez., 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-004-1305-1>.

PAULINO, G. M.; BARROSO, D. G.; LAMÔNICA, K. R.; COSTA, G. S.; CARNEIRO, J. G. de. A. Desempenho da gliricídia no cultivo em aleias em pomar orgânico de mangueira e gravioleira. *Revista Árvore*, v. 35, n. 4, p. 781–789, ago. 2011.

PEREIRA, A. R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão**. Belo Horizonte: FAPI, 2006. 70p.

PÉREZ-MARIN, A. M.; MENEZES, R. S. C.; SALCEDO, I. H. Produtividade de milho solteiro ou em aléias de gliricídia adubado com duas fontes orgânicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 5, p. 669-677, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2007000500009>.

PIAO, S.; LUYSSAERT, S.; CIAIS, P.; JANSSENS, I. A.; CHEN, A.; CAO, C.; WANG, S. Forest annual carbon cost: A global-scale analysis of autotrophic respiration. **Ecology**, v. 91, n. 3, p. 652-661, 2010.

POEPLAU, C.; DON, A.; SIX, J.; KAISER, M.; BENBI, D.; CHENU, C.; NIEDER, R. Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils—A comprehensive method comparison. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 125, p. 10-26, 2018.

PÔRTO, M.L.; ALVES, J.C.; DINIZ, A.A.; SOUZA, A.P.; SANTOS, D. Indicadores biológicos de qualidade do solo em diferentes sistemas de uso no Brejo Paraibano. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 4, p. 1011-1017, 2009.

POWLSON, D.S.; BROOKES, P.C.; CHRISTENSER, B.T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in the total soil organic matter due to straw incorporation. **Soil Biology & Biochemistry**. n. 19, p.159-164. 1987.

PUTTASO, A.; VITYAKON, P.; RASCHE, F.; SAENJAN, P.; TRELOGES, V.; CADISCH, G. Does organic residue quality influence carbon retention in a tropical sandy soil?. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 3, p. 1001-1011, 2013.

RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285p.

REICOSKY, D. C.; KEMPER, W. D.; LANGADALE, G. W.; DOUGLAS, C. L., RASMUNSEN, P. E. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. **Journal of Soil and Water Conservation**. v. 50, P.253-261, 1995.

ROSA, C. M. D.; CASTILHOS, R. M. V.; PAULETTO, E. A.; PILLON, C. N.; LEAL, O. D. A. Conteúdo de carbono orgânico em Planossolo Háplico sob sistemas de manejo do arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1769-1776, 2011.

ROSA, D.M.; NOBREGA, L.H.P.; MAULI, M.M.; LIMA, G.P.; PACHECO, F.P. Substâncias húmicas do solo cultivado com plantas de cobertura em rotação com milho e soja. **Revista Ciência Agronômica**. v.48, n.2, p.221-230, 2017.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Frações lábeis da matéria orgânica em sistema de cultivo com palha de braquiária e sorgo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 38-46, 2012.

ROWLEY, M. C.; GRAND, S.; VERRECCHIA, É. P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. *Biogeochemistry*, v. 137, n. 1, p. 27-49, 2018.

RUMPEL, C., AMIRASLANI, F., KOUTIKA, L.-S., SMITH, P., WHITEHEAD, D., WOLLENBERG, E. Put More Carbon in Soils to Meet Paris Climate Pledges. *Nature*, P-32-34, 2018.

SABADIN, H. C. Adubação verde. *Lavoura Arrozeira*. v.37, n.354, p.19-26, 1984.

SANTONJA, M.; FOUCAULT, Q.; RANCON, A.; GAUQUELIN, T.; FERNANDEZ, C.; BALDY, V.; MIRLEAU, P. Contrasting responses of bacterial and fungal communities to plant litter diversity in a Mediterranean oak forest. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 125, p. 27-36, 2018.

SANTOS, A. F.; MARIN, A. M. P.; DE ARRUDA SARMENTO, M. I. Produtividade da palma forrageira em aleias com *Gliricídia sepium* sob adubação orgânica em diferentes espaçamentos no Semiárido. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 13, n. 3, p. 276-281, 2018.

SANTOS, F. A. S.; PIERANGELI, M. A. P.; SILVA, F. L.; SERAFIM, M. E.; DE SOUSA, J. B.; DE OLIVEIRA, E. B. Dinâmica do carbono orgânico de solos sob pastagens em campos de murundus. *Scientia Agraria*, v. 18, n. 2, p. 43-53, 2017.

SCHIMEL, J.; SCHAEFFER, S. M. Microbial control over carbon cycling in soil. *Frontiers in microbiology*, v. 3, p. 348, 2012.

SENA, V. G. L. **Sequestro de carbono e eficiência do uso de nutrientes pelo milho em plantio direto sobre palha de leguminosas arbóreas**. 2019, 132 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2019.

SILVA, A. N. **Desempenho agrônômico de plantas com duplo propósito (cobertura e grãos) submetidas a regimes hídricos variáveis e sua influência nos atributos do solo e no milho em sucessão**, 2017, 103 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Brasília, 2017.

SILVA, I. D.; MENDONÇA, E. D. S. **Matéria orgânica do solo. Biologia dos solos dos cerrados**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1997.

SILVA, J.M.; ALMEIDA, A.C.P.S.; CRISTO, C.C.N.; MONTALDO, Y.C.M.; LIMA, K.C.V.; NASCIMENTO, M.S.; COSTA, J.A.Q.; SANTOS, T.M.C. Microbiological Attributes of a Cohesive Yellow Latosol Under Different Land Use Systems. *Journal of Agricultural Studies*, v. 8, n. 4, p. 696-711, 2020.

SILVA, J.M.; CRISTO, C. C. N.; MONTALDO, Y. C.; SILVA, C. DOS S.; SENA, E. DE O. A.; VIGODERIS, R. B.; OLIVEIRA, J.U.L.; SANTOS, T. M. C. Microbial activity and population of red-yellow podzolic soil under organic and conventional cultivation systems of *Citrus sinensis* (L.) Osbeck. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 42, n. 2, p. 41-50, 2019.

SILVA, R. R. D.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. D. S.; CURI, N.; ALIVISI, A. M. T. Biomassa e atividade microbiana em solos sob diferentes sistemas de

manejo na região fisiográfica campos das vertentes - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1585-1592, 2010.

SINGH, J. S.; GUPTA, V. K. Soil microbial biomass: a key soil driver in management of ecosystem functioning. **Science of the Total Environment**, v. 634, p. 497-500, 2018.

SOARES, D.D.S. **Biomassa vegetal e atributos do solo em diferentes sistemas de produção sob plantio direto no Cerrado**, 2017, 97 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Brasília, 2017.

SOKOL, N. W.; SANDERMAN, J.; BRADFORD, M. A. Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry. **Global Change Biology**, v. 25, n. 1, p. 12-24, 2019.

SOUZA, E. A. **Plantio direto na palha de leguminosas como estratégia para melhorar a eficiência de uso de nutrientes em milho Qpm**, 2013, 65 f. Dissertação (Mestrado em Agroecologia) – Universidade Estadual do Maranhão, 2013.

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

SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B.; SILVA, C. A.; BUZETTI, S. Frações do carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana em um Latossolo Vermelho sob cerrado submetido a diferentes sistemas de manejos e usos do solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 38, n. 6, p. 323-329, 2006.

SPOHN, M.; KLAUS, K.; WANEK, W.; RICHTER, A. Microbial carbon use efficiency and biomass turnover times depending on soil depth—Implications for carbon cycling. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 96, p. 74-81, 2016b.

STAVI, I.; BEL, G.; ZAADY, E. Soil functions and ecosystem services in conventional, conservation, and integrated agricultural systems. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 36, n. 2, p. 32, 2016.

SUMNER, M. E. Gypsum Improves Subsoil Root Growth. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ROOT RESEARCH AND APPLICATIONS**, p. 1-4, 2009.

TIAN, G.; BRUSSAARD, L.; KANG, B. T. An index for assessing the quality of plant residues and evaluating their effects on soil and crop in the (sub-) humid tropics. **Applied Soil Ecology**, v. 2, n. 1, p. 25-32, 1995.

VALENTINI, R.; MATTEUCCI, G.; DOLMAN, A. J.; SCHULZE, E. D.; REBMANN, C. J. M. E. A. G.; MOORS, E. J.; JARVIS, P. G. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. **Nature**, v. 404, n. 6780, p. 861-865, 2000.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil biology and Biochemistry**, v. 19, n. 6, p. 703-707, 1987.

VIEIRA, S.O . **Atividade microbiana de um argissolo vermelho-amarelo sob bosque de sabiá (*Mimosa caesalpinifolia* Benth).** 2021. Monografia (Bacharelado em Agronomia) - Universidade Federal de Alagoas , Rio Largo , 2021.

VON LÜTZOW, M., KÖGEL-KNABNER, I., EKSCHMITT, K., MATZNER, E., GUGGENBERGER, G., MARSCHNER, B., FLESS, H., 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions. *European Journal of Soil Science*, 57, 426–445.

WANG, Q.; YU, Y.; HE, T.; WANG, Y. Aboveground and belowground litter have equal contributions to soil CO₂ emission: an evidence from a 4-year measurement in a subtropical forest. *Plant and Soil*, v. 421, n. 1, p. 7-17, 2017.

WARDLE, D. A. Impacts of disturbance on detritus food webs in agro-ecosystems of contrasting tillage and weed management practices. *Advances in ecological research*, v. 26, p. 105-185, 1994.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; ALVARENGA, R. C. Organic-matter pools of soil under pines and annual cultures. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 41, n. 14, p. 1707-1722, 2010.

WHITTINGHILL, K. A., & HOBBIIE, S. E. Effects of pH and calcium on soil organic matter dynamics in Alaskan tundra. *Biogeochemistry*, v. 111, n. 1, p. 569-581, 2012.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2018: Building climate resilience for food security and nutrition.** Food & Agriculture Org., f. 101, 2018. 202 p.

WUDDIVIRA, M. N.; CAMPS-ROACH, G. Effects of organic matter and calcium on soil structural stability. *European Journal of Soil Science*, v. 58, n. 3, p. 722-727, 2007.

YAO, Z.; ZHANG, D.; YAO, P.; ZHAO, N.; LIU, N.; ZHAI, B.; GAO, Y. Coupling life-cycle assessment and the RothC model to estimate the carbon footprint of green manure-based wheat production in China. *Science of the Total Environment*, v. 607, p. 433-442, 2017.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications Soil Science and Plant Analysis*, v. 19, p. 1467-1476, New York 1988.

ZHENG, Q.; HU, Y.; RICHTER, A.; WANEK, W. Carbon use efficiency (CUE) and biomass turnover of soil microbial communities as affected by bedrock, land management and soil temperature and moisture. In: *EGU General Assembly Conference Abstracts* , p. 8307, 2017.

ZIGLIO, C. M.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Formas orgânicas e inorgânicas de mobilização do cálcio no solo. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 42, n. 2, p. 0-0, 1999.