



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

CINTHYA SOUSA VASCONCELOS

**INDICADORES BIOLÓGICOS DE UM ARGISSOLO ENRIQUECIDO COM
CÁLCIO EM FUNÇÃO DA QUALIDADE DA BIOMASSA APLICADA**

SÃO LUIS
2022

CINTHYA SOUSA VASCONCELOS

**INDICADORES BIOLÓGICOS 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 Engenheira Agrônoma.

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

SÃO LUIS
2022

Vasconcelos, Cinthya Sousa.

Indicadores biológicos de um argissolo enriquecido com cálcio em função da qualidade da biomassa aplicada / Cinthya Sousa Vasconcelos. – São Luís, 2022.

59 f

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

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura.

1.Eficiência do uso do carbono. 2.Serviços ecossistêmicos. 3.Quociente metabólico. I.Título.

CDU: 631.859

Elaborado por Gíselle Frazão Tavares - CRB 13/665

CINTHYA SOUSA VASCONCELOS

**INDICADORES BIOLÓGICOS 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 Engenheira Agrônoma.

Aprovada em: 19/01/2022

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dra. Camila Pinheiro Nobre
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Dr. Altamiro Sousa de Lima Ferraz Junior
Universidade Estadual do Maranhão

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus por ter me dado força, paciência e coragem durante essa caminhada. Dedico também aos meus pais por todo apoio, amor incondicional e sempre terem acreditado em mim, sem vocês nada disso teria sido possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente , gostaria de agradecer a Deus por ter me dado coragem para começar essa caminhada e principalmente força para enfrentar cada desafio que tive durante a graduação.

Aos meus pais e a minha irmã , por sempre terem apoiado os meus sonhos , me incentivaram e incentivam a sempre ir mais longe , nunca vou ter palavras suficientes para agradecer por tudo o que vocês fazem por mim.

A Edésio Cunha , por ter dedicado um tempo para me ajudar na realização desse trabalho , por ter me acolhido nos momentos de desespero , por todo apoio , companheirismo . por ser meu maior incentivador e melhor dupla de faculdade durante toda a graduação , sou grata por tudo que fez por mim .

A Dandara Serrano , obrigada pela amizade , por ser um dos meus suportes nessa caminhada , pelos ensinamentos e experiências compartilhadas.

Aos meus colegas de curso , por terem feito essa caminhada mais tranquila e divertida.

Ao professor Emanuel Gomes de Moura , por ter me acolhido e orientado durante esse período.

A minha coorientadora Jéssica Freitas , pela disponibilidade , paciência e orientação na elaboração desse trabalho.

A todos os professores da Agronomia , por todos os ensinamentos e preparo para a vida profissional , vocês contribuíram de forma significativa para a minha formação e sempre serei grata.

Mas os que esperam no SENHOR renovam as suas forças, sobem com asas como águias, correm e não se cansam, caminham e não se fatigam.

Isaías 40:31

RESUMO

Muitas das questões de sustentabilidade agrícola estão associadas à qualidade do solo. Assim, sua avaliação e a forma como ele muda ao longo do tempo é um indicador significativo para saber se o sistema de cultivo é sustentável. Este estudo tem como objetivo verificar as alterações dos indicadores biológicos 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 dos indicadores foram feitas para: biomassa microbiana do solo, respiração basal, carbono orgânico, enzima desidrogenase, carbono solúvel em água, frações da matéria orgânica, em foco ao carbono orgânico associado ao mineral e do atributo químico quanto a Ca^{+2} . Nossos resultados confirmam a hipótese de que biomassa de alta qualidade potencializa os mecanismos impulsadores da estabilização da MOS. A variação dos coeficientes biológicos, causou um aumento da necromassa microbiana e levou a um maior conteúdo 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 e diminuir a emissão dos gases do efeito estufa para a atmosfera.

Palavras-chave: Eficiência do uso do carbono. Serviços ecossistêmicos. Quociente metabólico.

ABSTRACT

Many of the agricultural sustainability issues are associated with soil quality. Thus, its assessment and the way it changes over time is a significant indicator of whether the farming system is sustainable. This study aims to verify the changes in the biological indicators 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 established 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 was a randomized block design, 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 + Glyricidia (S+G) and Control. The analyzes of the indicators were conducted for: soil microbial biomass, basal respiration, organic carbon, dehydrogenase enzyme, water-soluble carbon, organic matter fractions, focusing on the organic carbon associated with the mineral and the chemical attribute regarding Ca²⁺. Our results confirm the hypothesis that high-quality biomass enhances the mechanisms that drive MOS stabilization. The variation of biological coefficients caused an increase in microbial necromass and led to a higher content of the stable fraction of MOS. These results indicate that the use of high-quality biomass is an adequate strategy to increase soil carbon sequestration and reduce the emission of greenhouse gases into the atmosphere.

Keywords: Efficiency of carbon use. Ecosystem services. Metabolic quotient.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** Croqui do delineamento experimental , localizado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA 25
- Figura 2** Valores do quociente metabólico (qCO_2) 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 35
- Figura 3** Valores do quociente metabólico (qCO_2) 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 37
- Figura 4** Valores na relação entre desidrogenase/carbono solúvel em água 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..... 38
- Figura 5** Valores na relação entre desidrogenase/carbono solúvel em água 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..... 40

Figura 6 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 42

Figura 7 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 43

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 33
- Tabela 2** – Atributo químico (Cálcio) e carbono orgânico associado ao mineral (COAM) no solo, 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..... 45

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	Indicadores biológicos de qualidade do solo	16
3.2.1	Biomassa microbiana do solo	17
3.2.2	Respiração basal do solo	18
3.2.3	Quociente metabólico (qCO ₂)	19
3.2.4	Carbono orgânico do solo	20
3.2.5	Quociente microbiano (qMic).....	21
3.2.6	Atividade enzimática da desidrogenase e carbono solúvel	21
3.3	Uso de biomassa de diferentes qualidades e interação cátions polivalentes (Cálcio)	22
3.4	Eficiência do uso do carbono (EUC)	23
4	METODOLOGIA	24
4.1	Caracterização da área experimental	24
4.2	Histórico da área experimental	24
4.3	Delineamento experimental	24
4.4	Amostragem de solo.....	26
4.5	Análise química	26
4.6	Análise da biomassa microbiana do solo	26
4.7	Análise do carbono orgânico total do solo (COT)	27
4.8	Análise da respiração basal do solo.....	28
4.9	Quociente metabólico (QCO₂).....	29

4.10	Quociente microbiano (qMic)	29
4.11	Atividade enzimática da desidrogenase	30
4.12	Análise do carbono solúvel em água	30
4.13	Análise do fracionamento granulométrico da matéria orgânica do solo.....	31
4.14	Relação desidrogenase/ carbono solúvel em água	32
4.15	Qualidade da biomassa	32
4.16	Análises estatísticas	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1	Quociente metabólico (qCO ₂)	34
5.2	Relação desidrogenase/carbono solúvel em água.....	38
5.3	Quociente microbiano (qMic)	41
5.4	Atributo químico e carbono orgânico associado ao mineral (COAM).....	44
6	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

A população mundial está crescendo e se expandindo, em detrimento dos sistemas ambientais. A degradação na qualidade do solo e da perda de nutrientes presentes pode levar a danos na safra, redução na qualidade e a quantidade de alimentos disponíveis para essa população em rápido crescimento. E em busca de 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 (POZZA; FIELD, 2020 ; 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. Esta composição confere aos solos do estado propriedades agronômicas distintas, como a baixa resposta das culturas aos nutrientes minerais como Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), taxa de infiltração de água no solo muito baixa, decomposição acelerada da matéria orgânica, baixa capacidade de retenção de cátions e predisposição à coesão (MOURA; ALBUQUERQUE; AGUIAR, 2008).

A agricultura na periferia amazônica pode causar inúmeros desserviços, incluindo desmatamento e perda de habitat da vida selvagem, esgotamento dos nutrientes do solo, emissões de gases de efeito estufa e perda de biodiversidade (POWER, 2010). Em contraste, existem excelentes oportunidades para adotar práticas de gestão agrícola adequadas para obter os benefícios que os serviços ecossistêmicos podem fornecer para melhorar os indicadores de qualidade do solo como: sequestro de carbono, manutenção da matéria orgânica do solo, ciclagem de nutrientes e aumento da fertilidade do solo (PRADO et al., 2016; AGUIAR et al., 2013). A agricultura nesta região enfrenta enormes desafios para reverter o processo quanto à sustentabilidade ambiental e viabilidade socioeconômica, que podem ser agravados pelo aquecimento global, devido as emissões de CO₂ liberadas na atmosfera (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2018).

Muitas das questões de sustentabilidade agrícola estão associadas à qualidade do solo. Assim, sua avaliação e a forma como ela muda com o tempo são um indicador significativo para saber se o sistema de cultivo é sustentável (MASTO et al., 2007). O uso 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 - podem ajudar para a mitigação das mudanças climáticas, permitindo que os agroecossistemas

sejam mais resilientes aos seus impactos, para contribuir com o sequestro de carbono em solos (CHENU et al., 2019; ALMAGRO et al., 2016, 2017; STAVI et al., 2016).

Nesse sentido, a eficiência do uso do carbono (EUC) não é apenas um processo-chave no ciclo do carbono da vegetação, porque mede a eficiência de troca do dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera para a biomassa vegetal mas também exprime a alocação do C da vegetação para o armazenamento do carbono no solo (LUO et al., 2020).

Desse modo, os estudos sobre bioindicadores (através dos coeficientes biológicos) apontam a estima dos organismos constituintes da biota do solo, em atenção aos microrganismos, os quais se destacam por apresentarem características relevantes como atividade bioquímica e metabólica, proporcionando, assim, uma comparação melhor do que os indicadores individualmente e possuem respostas mais rápidas às alterações sofridas em seu ecossistema. (DE OLIVEIRA SILVA et al., 2021). O uso de diferentes tipos/fontes de biomassa, a combinação de leguminosas de alta e baixa qualidade permite com que o solo tenha uma boa ciclagem de nutrientes (AGUIAR et al., 2010). Dessa forma, espera-se que diferentes tipos/fontes ou biomassa com diferentes qualidades influenciem os indicadores biológicos do solo e que uma biomassa de alta qualidade potencialize os mecanismos impulsionadores da estabilização da matéria orgânica do solo (MOS).

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Verificar as alterações dos indicadores biológicos 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 a eficiência dos coeficientes biológicos para determinação dos mecanismos que elevam o acúmulo da matéria orgânica estável no solo;
- Determinar o efeito do quociente metabólico (qCO_2) sobre os processos que impulsionam o aumento da biomassa microbiana e sobre o grau de estabilização da matéria orgânica do solo (MOS);
- Verificar se a razão entre a atividade enzimática da desidrogenase/ carbono solúvel pode ser utilizado como um indicador da taxa de mineralização da matéria orgânica do solo;
- Estipular se a razão carbono da biomassa microbiana/carbono orgânico total reflete a qualidade da matéria orgânica do solo;
- Avaliar o efeito das interações da biomassa de leguminosas de diferentes qualidades com cátions polivalentes (Ca^{2+}) sobre a estabilidade de C no solo associada aos minerais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sistema de cultivo em aleias

O sistema de cultivo em aleias é uma prática utilizada para beneficiar solos pobres, pois se baseia na utilização de árvores com crescimento rápido, em fileiras devidamente espaçadas, para que possa inserir as culturas anuais. Nesse sistema, utilizam-se as podas e o uso da biomassa a fim de incorporar ao solo através de adubação verde (DE ANDRADE et al., 2012).

Neste sistema, a preferência por utilizar principalmente as leguminosas ocorre pela vantagem delas em promover a melhoria da fertilidade do solo, isso ocorre pelo ingresso de nitrogênio (N) no cultivo de aleias, por meio da fixação biológica (FBN), porém, pode ser mencionado também o fato de ter a captura de elementos percolados pelo perfil, permitindo com que estejam acessíveis na superfície, principalmente devido a prática da poda do sistema e a utilização de biomassa das árvores como cobertura edáfica (PARTEY et al., 2011).

A escolha das espécies para o sistema em aleias dependerá das condições climáticas, do solo e dos requisitos da cultura a ser implementada, mesmo que as plantas absorvam N, P e K em quantidades consideradas superiores, o que cada planta irá precisar tem influência diretamente com a cultura (DE ANDRADE et al., 2012).

O sistema de cultivo em aleias é capaz de recuperar a fertilidade de um solo, por causa da deposição da matéria orgânica que se encontra devido a biomassa vegetal produzida nas aleias, além disso, considerado ecológico, principalmente para a produção de alimentos, levando em conta os métodos agrícolas tradicionais. O sistema de cultivo em aleias possui diversos benefícios, dentre eles destacar-se o crescimento quanto a produtividade e a utilização adequada dos recursos hídricos e dos nutrientes do solo, sendo um bom fator para a proteção ambiental, com foco na sustentabilidade (QUINKENSTEIN et al., 2009).

3.2 Indicadores biológicos de qualidade do solo

O solo é popularmente conhecido como um recurso natural importante para que ocorra o funcionamento dos ecossistemas, por apresentar uma grande quantidade de seres vivos distintos que interagem e colaboram para a manutenção da vida na terra. Isso se refere à

qualidade do solo, ou seja, sua capacidade de manter a atividade biológica, promover o crescimento e a saúde de plantas e animais e, preservar a qualidade do meio ambiente (DE OLIVEIRA SILVA et al., 2021; DORAN e PARKIN, 1994). Dessa forma, em relação aos indicadores mais utilizados para avaliar a qualidade de um solo diante do manejo e uso, os mais indicados são aqueles que respondem as diversas alterações ambientais e podem sofrer transformações em curto e médio prazo (PEZARICO et al., 2013).

Bioindicadores são propriedades biológicas do solo que indicam o estado do ecossistema e representam uma abordagem ampla para avaliar e interpretar os efeitos desses distúrbios naturais ou antrópicos no solo. Por ser a parte mais viva e ativa da matéria orgânica do solo (MOS) e por participarem dos processos bioquímicos, esses indicadores são mais sensíveis que indicadores físicos e até mesmo químicos para identificar alterações que estão ocorrendo no uso e manejo do solo (STÖCKER et al., 2017; CHERUBIN et al., 2015 ; HEGER et al., 2012). A microbiota do solo possui atributos como a abundância e atividade bioquímica e metabólica, que permitem que ocorra respostas mais rápidas em relação as mudanças vistas no ambiente, com uma antecedência maior das que são encontradas nos indicadores físicos e químicos (ALVES, 2018; DE ARAÚJO; MONTEIRO, 2007).

Para que um atributo possa ser considerado um bom indicador biológico devem ser exatos e precisamente avaliados para se ter respostas em uma ampla escala de tipos e condições de solo; por causa do alto número de amostras analisadas normalmente, os atributos microbiológicos devem ser fáceis e econômicos de serem avaliados; sensíveis a estresses, mas suficientemente robustos para não fornecer alarmes falsos; devem ter validação científica, com base na realidade e conhecimento atual (BROOKES, 1995; VISSER e PARKINSON, 1992).

3.2.1 Biomassa microbiana do solo

A biomassa microbiana do solo (BMS) é um componente importante da matéria orgânica que tem por função regular a ciclagem de nutrientes no solo (FIALHO et al., 2020). Identificada como a parte viva e ativa da MOS, ela é composta por fungos, bactérias e actinomicetos que atuam em processos que podem estar relacionados à formação do solo, decomposição de resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes, biorremediação de áreas contaminadas por poluentes e outros (DOS REIS JUNIOR; MENDES, 2007).

A BMS é essencial para os sistemas agrícolas, pois pela observação de seus mecanismos é possível indicar a qualidade do solo que é diretamente influenciada pelas práticas

agrícolas (BARRETO et al., 2008). Ela responde rapidamente a adição de carbono e de nitrogênio ao solo, sendo capaz de determinar a decomposição da MOS, a relação C/N, a mineralização e imobilização de nutrientes (HATCH et al., 2000). De acordo com Silva et al. (2020), a biomassa microbiana do solo possui maior estabilidade em ecossistemas que não apresentam sucessivas influências no manejo, tendo uma máxima estabilidade.

O crescimento microbiano é restrito pela quantidade de nutrientes disponíveis no ambiente. Geralmente, a adição de fertilizantes sejam eles nitrogenados, podem provocar o crescimento da biomassa do solo, por exemplo, até mesmo o seu metabolismo (BONATO, 2021; GRAHAM et al., 2002). Em relação à quantidade de microbiana encontrada em um solo, é possível observar valores maiores nas camadas mais superficiais, isso ocorre pois tem uma maior disponibilidade de matéria orgânica, água e nutrientes (SILVA; MENDONÇA, 1997).

Por isso, determinar a biomassa microbiana de um solo é importante para se obter informações rápidas a respeito das transformações nas propriedades orgânicas no solo, detectar mudanças que podem ter sido ocasionadas por cultivos ou devastação das florestas ou até determinar a regeneração dos solos depois da remoção da camada superficial e, por fim, medir os efeitos da contaminação por elementos e pesticidas, por exemplo em áreas onde antes eram cobertas por cultivos agrícolas (ANDRADE et al., 2020). O anabolismo microbiano em relação ao catabolismo, refletido pela eficiência de uso de carbono (EUC), determina o destino de carbono transformado no solo (CHEN et al., 2020), além de indicar o aumento da biomassa viva do sistema.

3.2.2 Respiração basal do solo

A respiração basal do solo (RBS), também conhecido como C prontamente mineralizável, pode ser denominada segundo Silva et al., (2007) como: “ a soma de todas as funções metabólicas nas quais o dióxido de carbono (CO_2) é produzido”. Se refere à decomposição microbiana de resíduos de plantas mortas e matéria orgânica do solo, controlada pelas atividades microbianas e pelo conteúdo de carbono do solo (KUZYAKOV e GAVRICHKOVA., 2010). É um dos métodos mais usados para avaliar a atividade metabólica da população microbiana que habita no solo, devido a microbiota edáfica ser capaz de oxidar vários tipos de compostos orgânicos para a síntese de novas células, a mensuração da respiração

basal afeta diretamente a atividade dos microrganismos heterótrofos e informa sobre a bioatividade do solo (SILVA et al., 2020).

A RBS é um dos parâmetros mais antigos e assertivos usados para a quantificação da atividade metabólica nos solos (BARROSO et al., 2012). Como outras atividades metabólicas é dependente do estágio fisiológico da célula e levado por vários fatores no solo, como a umidade, temperatura, estrutura do solo e disponibilidade de nutrientes (RENELLA et al., 2005). Além disso, os microrganismos encontrados no solo degradam a matéria de origem orgânica, logo, ele vai ser transformado em nutrientes disponíveis para as plantas, o que também provoca aumento da respiração basal do solo (MEDEIROS et al. 2018).

Uma maior atividade respiratória pode causar tanto em uma grande reserva de substratos de C lábeis, na qual a decomposição da matéria orgânica é intensa, como em uma rápida decomposição de uma pequena reserva decorrente, por exemplo, de quebra de agregados do solo promovida por ela. Desse modo, altas taxas de respiração podem ser ocasionadas tanto por distúrbios ecológicos, como a incorporação de resíduos, quanto por um alto nível de produtividade do ecossistema. As mudanças da respiração microbiana podem refletir alterações na MOS, na ciclagem de nutrientes, e impacto de xenobióticos introduzidos ao solo (CHILDS, 2007; TÓTOLA; CHAER., 2002 ; ISLAM ; WEIL., 2000).

3.2.3 Quociente metabólico (qCO_2)

O quociente metabólico (qCO_2) é a taxa de solo da respiração microbiana (RBS) por unidade de biomassa microbiana e pode representar a capacidade dos microrganismos do solo de usar a matéria orgânica (JENKINSON e POWLSON, 1976). De acordo com Araújo et al. (2019) , as mudanças no quociente metabólico são reflexo da entrada da MOS, a eficiência da conversão do carbono microbiano, as perdas do carbono do solo e estabilização do C orgânico pela fração mineral do solo. Logo, ele pode apontar se há acúmulo ou perda do carbono no solo e o prazo em que o C se mostra imobilizado pelos microrganismos.

A BMS considerada eficiente ($<qCO_2$) possui menor taxa de respiração comparado a uma mesma BMS ineficiente ($>qCO_2$). Logo, vários fatores de estresse (podem ser classificados como “estado de equilíbrio” ou até como condições desfavoráveis, como é o caso dos metais pesados, limitações de nutrientes e baixo pH) e até mesmo fatores de perturbação, como exemplo as queimadas, podem promover a diminuição da eficiência microbiana (FERREIRA, et al., 2015).

Acredita-se que um baixo quociente metabólico pode ser economia no uso de energia e reflete em um ambiente estável ou próximo de ter seu estado de equilíbrio. Ao contrário disso, altos valores indicam um ecossistema submetido a condição seja de estresse ou distúrbios, na maioria das vezes. Solos que apresentam um alto qCO_2 são dominados por organismos que têm crescimento rápido, são os solos que usam muita energia e considerados instáveis por não se aproximarem de um equilíbrio no ecossistema (DE SOUZA DORNELLES, et al., 2017). Os valores do quociente metabólico são essenciais em estudos visam avaliar o efeito das condições ambientes sobre a atividade microbiana, através da caracterização da taxa de respiração específica da BMS, em que é atribuído como a quantidade de CO_2 por grama de biomassa em um período (FERNANDES et al, 2013).

3.2.4 Carbono orgânico do solo

O carbono orgânico do solo (COT) é um dos principais indicadores para qualidade do solo, sendo a sua avaliação essencial para verificar a sustentabilidade dos agroecossistemas. Devido a sua fácil e rápida medição e por se correlacionar a outros atributos do solo, o COT é indicador chave para avaliar aspectos físicos, químicos e biológicos do solo (JERKE et al., 2012). Além disso, o carbono orgânico é considerado um dos principais constituintes da MOS e, por isso, o acompanhamento das suas modificações pode auxiliar na escolha dos melhores sistemas de manejo a serem adotados (GUARESCHI et al., 2013).

A entrada de carbono orgânico no solo depende da presença de material orgânico através da senescência de certos componentes da biomassa acima e abaixo do solo, queda das folhas, resíduos da exploração e animais mortos, com suas respectivas taxas de decomposição. O clima, a textura e a estrutura do solo e as formas de manejo controlam os níveis de carbono no solo, principalmente quando há a conversão de ecossistemas nativos em áreas agrícolas (KIEHL, 2005; SCHLESINGER, 2000).

De acordo com Roscoe e Machado (2002), o carbono orgânico do solo provém do material vegetal, animal ou de microrganismos na forma de resíduos inalterados ou em vários estágios de decomposição e compostos humificados, e podem estar ligados ou não à fração mineral. Além disso, estes resíduos podem estar parcialmente ressintetizados e ao estarem em ativo estado de decomposição estão propícios ao ataque de microrganismos (SILVA e MENDONÇA, 1997). O carbono orgânico do solo também tem importância para a fertilidade

do solo, ciclagem de nutrientes, processos de adsorção, estrutura e estabilidade do solo, na infiltração, além de ser o substrato para os organismos vivos (HARTEMINK et al., 2014).

3.2.5 Quociente microbiano (qMic)

O quociente microbiano (qMic) representa a relação entre o carbono da biomassa microbiana e o carbono orgânico total (COT). Essa relação tem sido usada como indicador da qualidade da matéria orgânica do solo, mostrando a quantidade de carbono orgânico que está imobilizada na biomassa e demonstra a eficiência dos microrganismos na utilização dos compostos orgânicos (SILVA et al., 2010).

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).

3.2.6 Atividade enzimática da desidrogenase e carbono solúvel

As enzimas do solo são os principais participantes nos processos bioquímicos de reciclagem da matéria orgânica no sistema do solo e suas atividades estão intimamente relacionadas à MOS, propriedades físicas do solo e atividade microbiana (MOSCATELLI et al., 2018). Durante a decomposição da MOS e do ciclo de nutrientes, as enzimas do solo atuam como catalisadores necessários e influenciam fortemente a transformação de energia, a qualidade ambiental e a produtividade agrônômica. As enzimas do solo fornecem detecção precoce de mudanças na saúde do solo porque respondem às mudanças no manejo e fatores ambientais muito mais rápido do que outros parâmetros de qualidade do solo (JAT et al., 2021).

A atividade da enzima desidrogenase é considerada o indicador da atividade oxidativa dos microrganismos do solo e aumenta significativamente com a aplicação de fertilização balanceada (SRINIVASA RAO et al., 2017), além disso, é conhecida por ter sua atividade ligada a respiração referente a atividade metabólica (BALOTA et al., 2014). Essa enzima pertence ao grupo das oxirredutases de organismos aeróbios e dos anaeróbios, tem sua atuação no sistema transportador de elétrons, na cadeia respiratória, agindo diretamente no processo de energia (FLEMMING, 2016).

O carbono solúvel em água (CSA) é um constituinte do solo e da água superficial, as substâncias solúveis, que são encontradas na água retidas nos poros do solo, podem exercer substancial alcance sobre os processos iônicos, o ciclo dos nutrientes, dinâmica da comunidade microbiana e por fim, o intemperismo mineral nos solos (EVANS JR. et al., 1988). Conhecido como uma fração lábil que se apresenta muito reativo no solo (LIANG et al., 1998). A razão entre a enzima desidrogenase e o carbono solúvel em água é considerado outro coeficiente biológico importante para este estudo, em que segundo Masciandaro et al. (1998), “este índice é capaz de indicar a taxa de mineralização da matéria orgânica do solo”.

3.3 Uso de biomassa de diferentes qualidades e interação cátions polivalentes (Cálcio)

Ao usar biomassa de diferentes qualidades, os resíduos de plantas de alta qualidade (baixa relação C / N, baixo teor de lignina e polifenóis), que se decompõem rapidamente, podem ter um efeito nutricional direto como adubo verde. Resíduos de plantas de baixa qualidade (alta relação C/N, alto teor de lignina e polifenóis), que se decompõem lentamente, podem ter maiores efeitos na evaporação da água do solo, aumento da matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, capacidade de enraizamento do solo (MULUMBA e LAL, 2008; TIAN et al., 1995). Logo, uma estratégia de aproveitamento eficiente dos serviços ecossistêmicos para garantir a sustentabilidade e viabilidade dos agroecossistemas amazônicos, deve incluir o uso de resíduos de alta e baixa qualidade (MOURA et al., 2021).

A interação do uso de cátions polivalentes neste estudo está associada à presença do cálcio (Ca^{2+}), no qual o solo enriquecido com este cátion, permite um acúmulo de matéria orgânica no solo, que é estabilizado por associação mineral, ao aumentar a capacidade do solo de reter esses cátions, em que melhora a capacidade de enraizamento do solo e evita os efeitos adversos da concentração dos cátions ácidos na zona radicular (RAMOS et al., 2018).

Além disso, nos solos com a presença de Ca^{2+} , os mecanismos que permitem as mudanças microbianas na biomassa levam a criação de produtos orgânicos mais estáveis, isso

através da formação das pontes com cálcio que ficam armazenadas no perfil (SCHMIDT et al., 2011; VON LUTZOW et al., 2006). Segundo Igue e Pavan (1984) e Da Costa e Da Costa (1991), “movimento de Ca^{2+} no solo através de compostos orgânicos é de especial interesse devido à alta capacidade de produção de biomassa das plantas utilizadas nos sistemas brasileiros de cultivo”.

3.4 Eficiência do uso do carbono (EUC)

A eficiência do uso do carbono (EUC) não é apenas um componente-chave no ciclo do carbono da vegetação. Ela mede a eficiência de troca do dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera para a biomassa vegetal, mas também revela a alocação da vegetação para o armazenamento e consumo de carbono (LUO et al., 2020). As previsões dos estoques de carbono do solo são altamente sensíveis às suposições feitas sobre a eficiência do uso do carbono microbiano (EUC) (LI et al., 2018 ; WIEDER et al., 2014), que é a fração de carbono (C) absorvida pelas células microbianas e retida na biomassa em oposição a ser respirada .

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

Este parâmetro é utilizado 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 eficiência do uso do carbono pode contribuir para modificações em previsões de carbono para modelos de ciclo biogeoquímico (MACINNIS-NG et al., 2011). Além disso, a previsão da EUC pode ser um guia útil para atividades de manejo em resposta às mudanças climáticas, uma vez que uma EUC mais elevada causa 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°C.

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 subdividas em três subparcelas. 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.

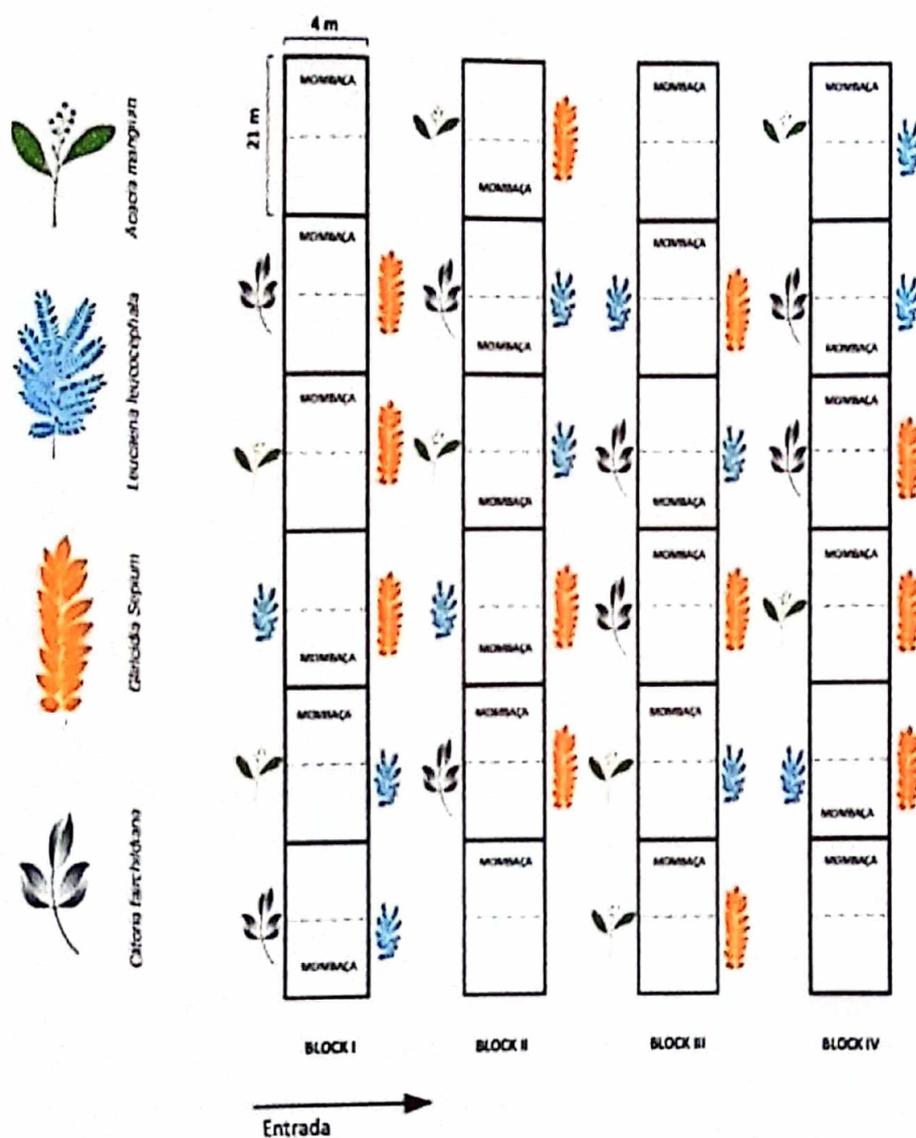


Figura 1 Croqui do delineamento experimental, localizado na Universidade Estadual do Maranhão, em São Luis-MA.

Fonte: VASCONCELOS, C.S. (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 Análise química

Quanto à análise química do solo, as amostras foram analisadas para Ca^{+2} , usando o ES ICP Espectrômetro de análise, segundo metodologia de Raij et al (2001).

4.6 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 ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 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 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.

4.7 Análise do carbono orgânico total do solo (COT)

Foi determinado 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 resfriar 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})

M_{am} = Massa da amostra em mg (500 mg)

4.8 Análise da respiração basal do solo

Determinou-se a respiração microbiana do solo por meio da captura do CO_2 evoluído segundo Jenkinson e Powlson (1976). As amostras foram analisadas em duplicatas. A amostra inicial foi dividida em duas subamostras de 50g e acondicionada em frascos herméticos de 250 mL. Em cada frasco com solo devidamente pesado, foi adicionado um frasco de béquer com 10 mL do agente aprisionador de CO_2 (Hidróxido de sódio - NaOH 1 M). Para melhorar a vedação, foi colocado um plástico na boca dos frascos, quando foram fechados, para que não ocorresse entrada ou fuga de CO_2 . Para a prova branca, o mesmo procedimento foi realizado, a única diferença é que no frasco hermético dessa amostra, não havia solo.

O período de incubação foi de três (3) dias em local sem luminosidade e com temperatura de $27,5^\circ \text{C}$. Após o processo de incubação, os frascos de béquer foram retirados, e a esses, foram adicionados 2 mL de cloreto de bário (BaCl_2 10%), para aprisionamento do CO_2 .

Os frascos de béquer foram fechados para evitar reação com o ambiente externo. Em seguida, a amostra foi destampada. Foram adicionadas duas gotas de fenolftaleína para servir de indicador, utilizando-se ácido clorídrico (HCl 0,5 M) para a titulação. O ponto de viragem foi observado quando a coloração passou de rosa para transparente.

O cálculo da respiração basal do solo é dado pela equação:

$$\text{RBS (mg de C-CO}_2 \text{ Kg}^{-1} \text{ solo hora}^{-1}) = \{(vb - va) \cdot M \cdot 6 \cdot 1000\} / PS \cdot T$$

Onde: RBS = carbono oriundo da respiração basal do solo; vb (mL) = volume do ácido clorídrico gasto na titulação da solução controle branco; va (mL) = volume gasto na titulação da amostra; M = molaridade exata do HCl; Ps (g) = massa de solo seco e T = tempo de incubação da amostra em horas.

4.9 Quociente metabólico (qCO₂)

A partir dos resultados de Respiração Basal do Solo (RBS) e do teor de biomassa microbiana do solo (BMS) calcula-se o quociente metabólico (qCO₂), conforme proposto por Anderson e Domsch (1993). Por meio da equação:

$$q\text{CO}_2 = \frac{\text{RBS}}{\text{BMS} - \text{C (mg de C kg}^{-1} \text{ de solo)} \cdot 10^{-3}} \cdot 1000$$

Em que:

qCO₂ – quociente metabólico do solo (mgC-CO₂.g⁻¹CBM-C.h⁻¹);

RBS – respiração basal do solo;

BMS – biomassa microbiana do solo.

4.10 Quociente microbiano (qMic)

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

$$q_{\text{Mic}} = \frac{(BMS/COT)}{10}$$

Em que:

q_{Mic} – 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).

4.11 Atividade enzimática da desidrogenase

De acordo com CASIDA Jr., L.E.; KLEIN, D.A.; SANTORO, 1964, para esta análise, foi pesado 5g de solo em um tubo de ensaio com tampa rosqueável e adicionado 5mL de solução 2,3,5 tripheniltetrazolio (TTC) a 1% em água, foram agitados vigorosamente, colocados em banho-maria a 37°C durante 24h, e agitados novamente. Após esse período, foi efetuada a extração com 10mL de metanol, agitação e decantação do solo, retirada do sobrenadante com pipeta Pasteur para transferência para tubos de centrífuga e centrifugação da solução por 10 minutos a 3400rpm. Em seguida, foi transferido o sobrenadante para uma cubeta e efetuada a leitura em espectrofotômetro a 485nm, com abertura de fenda. Foi preparado uma solução de trifênil formazan (TTF) a 30ppm (3mg/100mL $^{-1}$) em metanol P.A. A partir dessa solução-estoque foram feitas diluições, pipetando-se volumes de 1 a 9 mL para balões volumétricos de 10 mL, completando-se o volume do balão com metanol PA. Dessa forma, obteve-se concentrações que variam de 3 a 27ppm. A leitura da absorbância foi feita em espectrofotômetro a 485nm, e construído um gráfico de absorbância x concentração.

4.12 Análise do carbono solúvel em água

O procedimento de análise de carbono solúvel em água foi adaptado do método colorimétrico descrito por De Mendonça e Matos (2005). Após secas ao ar, as amostras de solo coletadas foram peneiradas em malha de 0,250 mm (60 Mesh). Em seguida, foram pesados 10 gramas de solo peneirado em erlenmeyers de 125 mL, acrescentando-se 20 mL de água deionizada, obtendo-se a relação solo-extrator 1:2. Em seguida, foram agitados em agitador horizontal (220 rpm) por 15 minutos e centrifugados por mais 10 minutos a 1500 rpm. Os extratos foram filtrados em papel filtro quantitativo. Foram pipetados 2,5 mL do filtrado,

adicionando-se em ordem cronológica: 2,5 mL de H₂O destilada, 2,5 mL do reagente de trabalho (RT) e 2,5 mL de H₂SO₄ (ácido sulfúrico concentrado). Os extratos foram deixados em repouso por 18 horas e submetidos à leitura em espectrofotômetro a 495 nm. Os teores de C nos extratos foram determinados a partir de uma curva padrão preparada com ácido oxálico diidratado, nas concentrações de 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,2; 1,6 e 2,0 mmol C L⁻¹. Os valores finais foram transformados em mg C kg⁻¹ de solo.

O reagente de trabalho (RT) foi preparado adicionando-se, em um balão volumétrico de 250 mL, em ordem: 75 mL de pirofosfato de sódio (Na₄P₂O₇ 0,1 mol L⁻¹), 11,5 mL de ácido sulfúrico (H₂SO₄ 0,5 mol L⁻¹) e 5 mL de permanganato de potássio (KMnO₄ 0,10 mol L⁻¹). O balão foi agitado manualmente e foram acrescentados imediatamente a seguir, com agitação, 20 mL de sulfato de manganês (MnSO₄ 0,1 mol L⁻¹). O volume foi completado com água destilada. A preparação do RT foi sempre realizada no dia de seu uso, para evitar sua oxidação e perda de cor.

4.13 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°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:

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

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

O teor de carbono orgânico 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:

$$COAM = COT - COP$$

4.14 Relação Desidrogenase/ Carbono solúvel em água

Essa relação é obtida através da divisão da atividade da desidrogenase por carbono solúvel em água, sendo expresso em ug|TPF/mg kg⁻¹ CSA.

4.15 Qualidade da biomassa

Foi avaliado a influência da qualidade da biomassa sobre os indicadores biológicos do solo, atributo químico e carbono orgânico associado ao mineral, 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+Gliricidia (L+G)	15,6	12,4
Acácia+Gliricidia (A+G)	19,6	18,4
Sombreiro+Gliricidia (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.

4.16 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

Segundo Bastida et al. (2008), a qualidade do solo como um conceito foi amplamente definido e, talvez por este motivo, está longe de ser uma medida objetiva. Nesse sentido, este estudo irá discutir os parâmetros de qualidade do solo a partir dos coeficientes biológicos a seguir, pois através deles é possível avaliar o funcionamento do ecossistema e os aspectos da qualidade do solo de forma mais eficaz para hipótese do estudo.

5.1 Quociente metabólico (qCO_2)

O quociente metabólico (qCO_2) é um índice que expressa a relação entre a respiração basal do solo ($C-CO_2$) e a biomassa microbiana (BMS), em que valores elevados são encontrados em condições ambientais estressantes, nas quais a biomassa microbiana necessita de mais carbono para sua manutenção (MENDES et al., 2009). Portanto, reflete o influxo de energia (carbono) através da biomassa microbiana do solo (LACERDA et al., 2013). Na camada de 0-10 cm (Figura 2), o qCO_2 variou de forma significativa ($P < 0,05$) em algumas combinações. Acredita-se que devido à baixa relação C/N da combinação L+G com capim Mombaça, foi possível observar um valor de apenas $9 \text{ mgC-CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{ BMS}_C \cdot \text{h}^{-1}$, com isso, houve menor perda de C na forma de CO_2 . Neste caso devido à alta razão anabolismo/catabolismo microbiano e o substrato microbiano ser de alta qualidade, proporciona uma maior necromassa microbiana, portanto, ocorre o acúmulo de C, consequentemente, a eficiência do uso de carbono (EUC) no sistema será mais alta, já que quanto maior é o sequestro de carbono no solo, acredita-se que maior será a EUC. Segundo Zheng et al., (2016) essa eficiência do uso do carbono (EUC) 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. Já a combinação de Acácia+Leucena (A+L) com a presença do capim Mombaça, apresentou o valor de $14 \text{ mgC-CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{ BMS}_C \cdot \text{h}^{-1}$ de quociente metabólico.

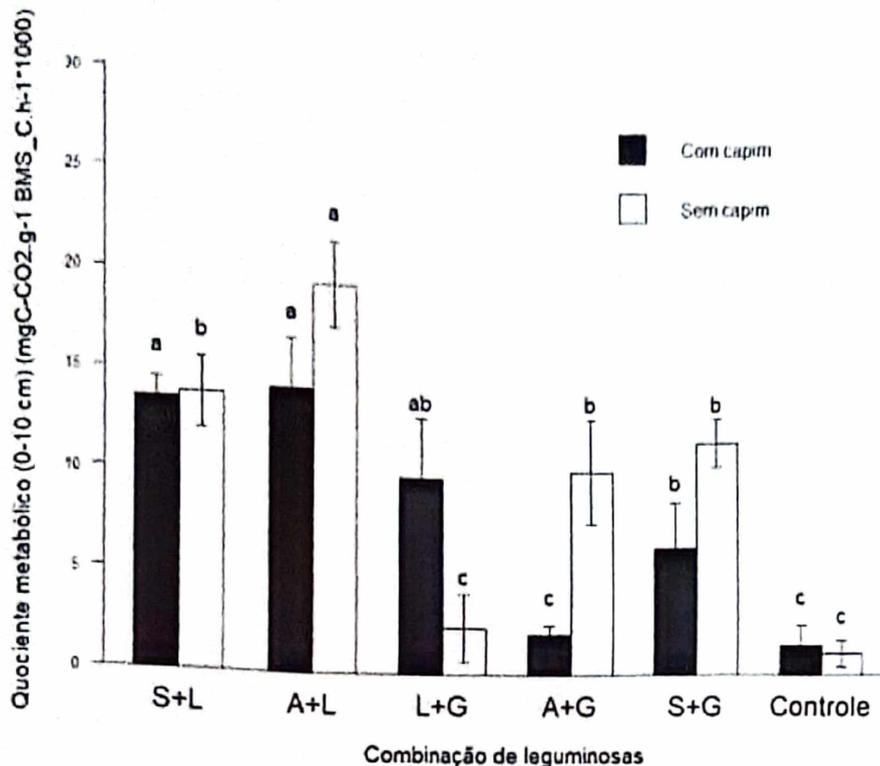


Figura 2 Valores do quociente metabólico (qCO₂) na profundidade de 0-10 cm, de um experimento em sistema de aleias com e sem capim Mombaça, instalado na Universidade Estadual do Maranhão, em São Luis-MA. S+L = Sombreiro+Leucena; A+L= Acácia+Leucena; L+G= Leucena+Gliricidia; A+G = Acácia+Gliricidia; S+G= Sombreiro+Gliricidia. Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey.

A combinação das médias da biomassa microbiana e respiração fornecem a quantidade de CO₂ evoluída por unidade de biomassa, em que aborda a ideia do quociente metabólico ou respiratório (qCO₂). Esse quociente vai indicar a eficiência da biomassa microbiana em utilizar o carbono disponível para biossíntese, sendo um sensível indicador para estimar a atividade biológica e a qualidade do substrato (SAVIOZZI et al., 2002).

Na combinação de Leucena+Gliricidia (L+G) comparado a Acácia+Gliricidia (A+G) com capim Mombaça, notou-se também diferenças significativas (P<0,05). No entanto, a combinação A+G apresentou um menor qCO₂, no valor de 3 mgC-CO₂.g⁻¹ BMS_C.h⁻¹. Acredita-se que a combinação com uma leguminosa de baixa e alta qualidade, pode ter influenciado para uma menor respiração e conseqüentemente menor qCO₂. A presença da Gliricidia (biomassa de alta qualidade) provoca o aumento da necromassa microbiana, que ao interagir com o conteúdo de cálcio nesta combinação em alta quantidade, provoca a

estabilização da matéria orgânica do solo e libera menos CO_2 para a atmosfera através da respiração, o que possibilita uma eficiência do uso de carbono pelo sistema.

Quando se trata da combinação de Sombreiro+Gliricídia (S+G) com capim Mombaça, em relação a A+G também com a presença do capim, o quociente metabólico em S+G foi de $6 \text{ mgC-CO}_2\cdot\text{g}^{-1} \text{ BMS_C}\cdot\text{h}^{-1}$, considerado alto se comparado a combinação de A+G. Mesmo que a relação C/N da combinação de Sombreiro+Gliricídia apresenta-se menor, provavelmente a quantidade de cátion polivalente (cálcio) presente nela é baixa, devido à dificuldade desta combinação em reter cátions no solo, que pode estar atrelado ao fato de não ser observado um acúmulo de MOS, dificultando que ocorra a sua estabilização.

As combinações de leguminosas sem a presença do capim apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$). Em relação a A+L, foi encontrado um valor de $19 \text{ mgC-CO}_2\cdot\text{g}^{-1} \text{ BMS_C}\cdot\text{h}^{-1}$, enquanto S+L e L+G obtiveram resultados inferiores de $q\text{CO}_2$, de 14,6 e 3,4 $\text{mgC-CO}_2\cdot\text{g}^{-1} \text{ BMS_C}\cdot\text{h}^{-1}$, respectivamente. O quociente metabólico é um indicador importante de qualidade do solo, logo, valores mais elevados de $q\text{CO}_2$ como o encontrado na combinação de A+L indicam que cada unidade de carbono da biomassa microbiana está gerando maior quantidade de respiração, diminuindo a quantidade de carbono estabilizado no solo.

Na camada de 10-20 cm do quociente metabólico (Figura 3), foi observado diferenças significativas ($p < 0,05$) na presença do capim Mombaça. Os valores encontrados mostram um baixo $q\text{CO}_2$ em boa parte das combinações de leguminosas, em que todos os valores foram superiores a atividade de $q\text{CO}_2$ no controle. Nas combinações com a presença de leguminosas de alta qualidade, como as que tem a presença de Leucena e Gliricídia, notou-se valores que variaram de 5 a 6 $\text{mgC-CO}_2\cdot\text{g}^{-1} \text{ BMS_C}\cdot\text{h}^{-1}$. O quociente metabólico microbiano do solo ($q\text{CO}_2$) reflete a quantidade e a qualidade da matéria orgânica do solo, a disponibilidade de nutrientes do solo, a eficiência de utilização do substrato microbiano e a estabilidade do ecossistema (MAO et al. 2010). Segundo Sampaio et al., 2008, o menor $q\text{CO}_2$ evidencia que a biomassa microbiana é mais eficiente no uso de carbono (C), diminuindo as perdas por CO_2 e incorporando mais C nos tecidos microbianos. A provável resposta para esses menores valores do quociente metabólico nestas combinações, pode ser devido as poucas perdas de carbono no sistema na forma de CO_2 , o que implica em menor emissão de CO_2 para o ambiente, permitindo que o carbono seja estocado no solo e aumente a eficiência do uso do carbono. Segundo Manzoni et al., (2012) e Spohn et al., (2016b) uma EUC mais alta reflete um crescimento microbiano mais eficiente e menos emissão de C na atmosfera por meio da

respiração, conseqüentemente não contribuirá para danos ambientais como efeito estufa e aquecimento global.

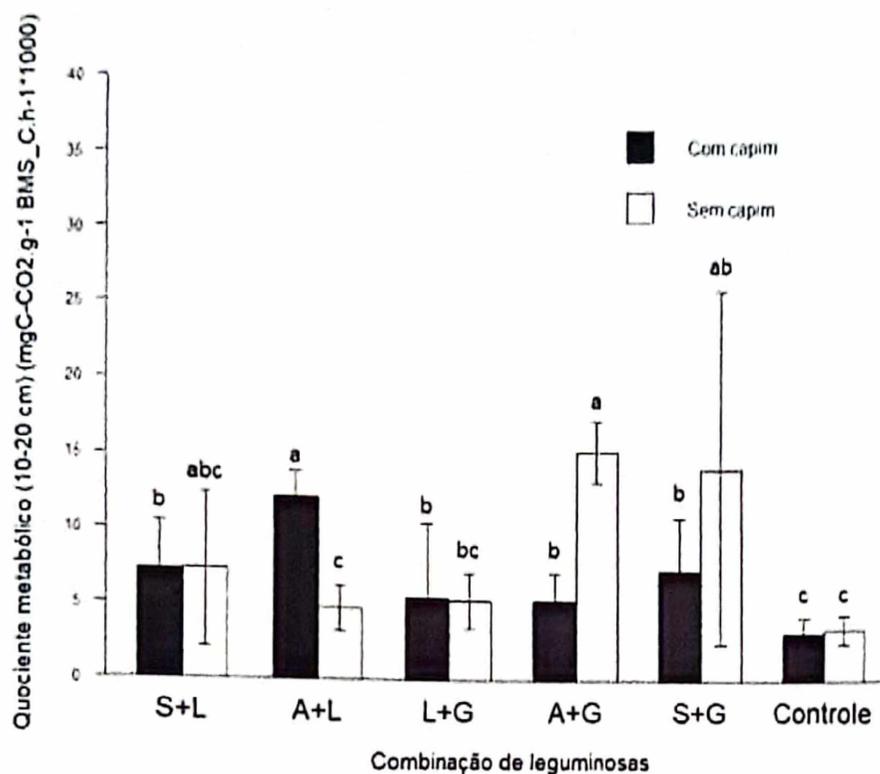


Figura 3 Valores do quociente metabólico (qCO₂) na profundidade de 10-20 cm, de um experimento em sistema de aleias, com e sem capim Mombaça, instalado na Universidade Estadual do Maranhão, em São Luis-MA. S+L = Sombreiro+Leucena; A+L= Acácia+Leucena; L+G= Leucena+Gliricidia; A+G = Acácia+Gliricidia; S+G= Sombreiro+Gliricidia. Letras diferentes indicam diferenças no nível de 5% por teste de Tukey.

De acordo com Moreira; Siqueira (2006), somente de 15 a 30% da biomassa microbiana no solo é catabolicamente ativa, o restante dos microrganismos é encontrado em formas inativas ou latentes, portanto com baixa atividade metabólica. O quociente metabólico pode expressar tanto a disponibilidade de material facilmente decomponível no solo, quanto as condições de estresse. Esse último pode ser atribuído a desestabilização da MOS, ao rompimento de agregados por erosão ou condições de manejo, ou ainda degradabilidade de um solo, frente as condições climáticas de cada região de estudo (SILVA, 2017).

Em relação as combinações de leguminosas sem a presença do capim Mombaça, ocorreu diferenças significativas ($p < 0,05$). O qCO₂ na combinação de A+G foi maior na profundidade de 10-20 cm, no valor de 15,2 mgC-CO₂.g⁻¹ BMS_C.h⁻¹. Para esse resultado, acredita-se que a população microbiana pode estar oxidando carbono de suas próprias células

para a sua manutenção e adaptação ao solo, em que a presença de uma leguminosa de baixa qualidade pode estar prejudicando essa adaptação.

5.2 Relação desidrogenase/carbono solúvel em água

Na camada de 0-10 cm quando se trata da relação desidrogenase/carbono solúvel em água (Figura 4) quando ocorre a presença do capim Mombaça, há diferenças significativas ($p < 0,05$). É possível que uma maior quantidade de carbono solúvel em água possa ter influenciado a razão, que foi maior na combinação de L+G, no valor de $14,7 \text{ ug|TPF/mg kg}^{-1} \text{ CSA}$. Segundo Huang e Song (2010), o carbono solúvel em água é a principal fonte de energia e carbono dos microrganismos do solo, logo, o carbono solúvel em água influencia diretamente na atividade enzimática. Isso levou o crescimento da atividade microbiana nesta combinação, e consequentemente, uma maior decomposição da biomassa, assim, como, um aumento na taxa de mineralização, pois, de acordo com Alves.(2009), quanto maior é a atividade microbiana de um solo, ocorrerá a aceleração da mineralização da matéria orgânica.

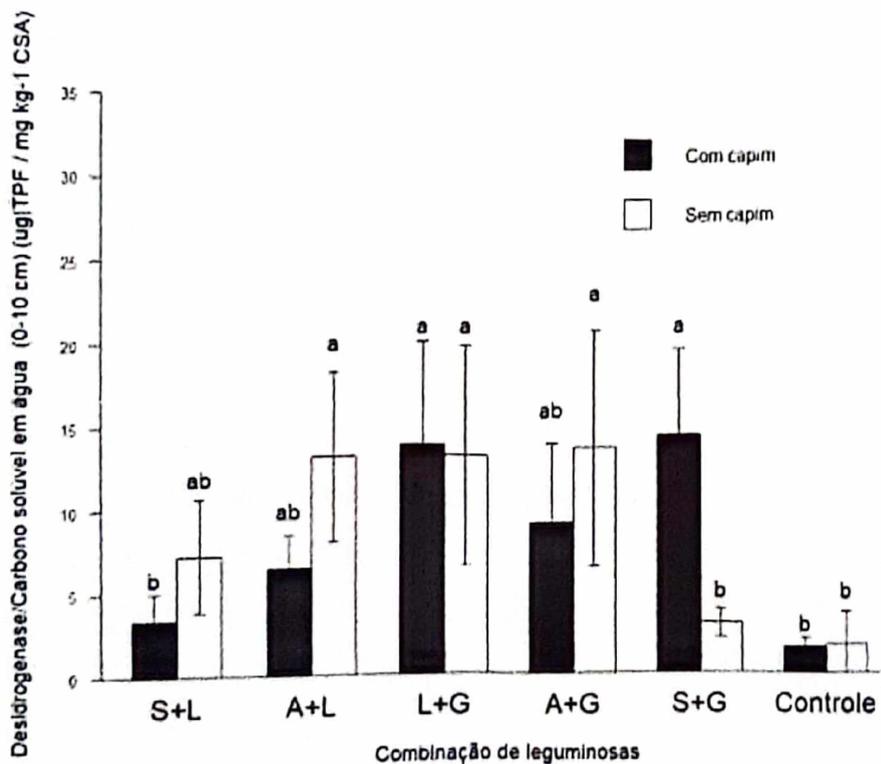


Figura 4 Valores na relação entre desidrogenase/carbono solúvel em água na profundidade de 0-10 cm, de um experimento em sistema de aleias, com e sem capim Mombaça, instalado na Universidade Estadual do Maranhão, em São Luis-MA. S+L = Sombreiro+Leucena; A+L= Acácia+Leucena; L+G= Leucena+Gliricídia; A+G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

Quando se observa os valores da razão nas combinações sem a presença do capim, apenas com os resíduos das leguminosas, foi visto diferenças significativas ($p < 0,05$). Verificou-se que todas as combinações que apresentam a mistura seja com *Gliricídia* ou *Leucena* tiveram altos valores, em que os de A+L, L+G e A+G foram 14 e 14,3 $\mu\text{g|TPF/mg kg}^{-1}$ CSA, respectivamente. Isso indica que influenciou positivamente tanto na presença da atividade microbiana quanto na de carbono solúvel em água. Os resíduos orgânicos contribuem para aumentar o estoque de carbono no solo e a atividade microbiana do solo (CERETTA et al., 2003; ROCHA et al., 2004; STARK et al., 2007), sendo fundamental no aumento da capacidade produtiva do solo (MELO et al., 2008). As transformações que ocorrem no processo de decomposição desses resíduos são na seguinte ordem: biodegradação rápida da maioria dos compostos hidrossolúveis e polissacarídeos, redução lenta de hidrossolúveis fenólicos e hemiceluloses e aumento relativo do conteúdo de ligninas e proteínas (CORREIA e ANDRADE, 1999).

A mineralização da matéria orgânica do solo (MOS) é um importante processo mediado por microrganismos pelo qual carbono, nitrogênio e outros nutrientes são convertidos de formas orgânicas em formas inorgânicas. Os microrganismos do solo devem produzir enzimas do solo para catalisar a degradação do solo da matéria orgânica e para fazer compostos dissolvidos prontamente utilizáveis para crescimento e metabolismo (DEMISIE et al., 2014).

Na camada de 10-20 cm da relação desidrogenase/carbono solúvel em água (Figura 5), com a presença do capim *Mombaça*, houve diferenças significativas ($p < 0,05$). Os valores encontrados em algumas combinações foram considerados baixos, principalmente em L+G, com 4,7 $\mu\text{g|TPF/mg kg}^{-1}$ CSA, o que foi observado sem a presença do capim, na qual também foi visto diferenças significativas ($p < 0,05$) e na combinação de L+G teve apenas 3,8 $\mu\text{g|TPF/mg kg}^{-1}$ CSA. Baixos valores nessa razão podem ser explicados pela baixa quantidade de atividade microbiana por meio da desidrogenase, provocado principalmente pela camada, já que a atividade das enzimas costuma diminuir em profundidade. Com isso, é possível que a taxa de mineralização seja reduzida com a diminuição da atividade microbiana, na presença de biomassa de maior qualidade. Ademais, foi visto que na combinação S+G com capim e na S+L sem capim, mesmo com a profundidade de 10-20 cm, encontrou-se valores altos dessa razão, isso pode ser explicado pela combinação de resíduos de alta e baixa qualidade, que podem ter influenciado na presença do carbono solúvel em água, tendo mais atividade da desidrogenase. Segundo Zamulina et al., 2020, a dinâmica do CSA está intimamente relacionada a atividade da

desidrogenase, que é uma das características mais objetivas da abundância e da atividade metabólica das comunidades microbianas do solo.

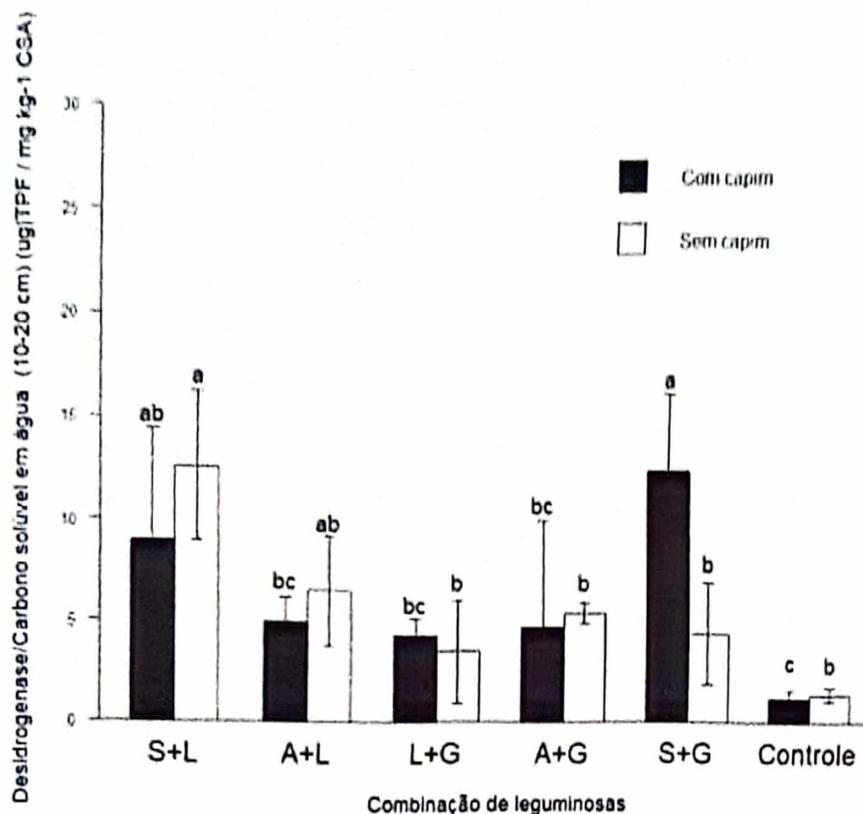


Figura 5 Valores na relação entre desidrogenase/carbono solúvel em água na profundidade de 10-20 cm, de um experimento em sistema de aleias, com e sem capim Mombaça, instalado na Universidade Estadual do Maranhão, em São Luís-MA. S+L = Sombreiro+Leucena; A+L= Acácia+Leucena; L+G= Leucena+Gliricídia;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

Segundo Haynes.(2000),o carbono solúvel em água é uma fração lábil que pode ser usada como um indicador de mudanças de curto prazo no status de carbono dos solos. O carbono solúvel é um componente orgânico do solo e está intimamente relacionado a biomassa microbiana do solo e a microagregação pode, portanto, ser usado como um dos indicadores de qualidade do solo (GHANI et al.,2003).

Juntamente com a atividade da desidrogenase, que é responsável pela atividade oxidativa dos microrganismos do solos, essa razão pode vir a ser uma indicadora a respeito de como está a taxa de mineralização de um solo. Ela pode ser afetada geralmente pelas mudanças no solo físico e propriedades químicas, bem como a quantidade e qualidade da serapilheira. As mudanças no pH do solo causadas pela mudança no uso da terra diretamente regulamentam a rotatividade do carbono no solo, afetando a composição e atividade das comunidades microbianas (LI et al.,2019).

5.3 Quociente microbiano (qMic)

Segundo Silva et al. (2010), o quociente microbiano do solo é um indicador da quantidade de carbono do solo que está imobilizado na biomassa microbiana, ou seja, quando há aumento dos valores desse atributo, é correto afirmar que há incorporação de carbono nas células dos microorganismos habitantes do solo. Nesse sentido, de acordo com Cunha, Mendes e Giongo (2015) o quociente microbiano representa a qualidade nutricional da matéria orgânica. À medida que aumenta a liberação de CO₂ pela respiração dos microorganismos, o quociente microbiano tem tendência a aumentar (RATCLIFFE; BOSMAN; CARNOL, 2018). Na camada de 0-10 cm do quociente microbiano (Figura 6), na presença do capim Mombaça, notou-se diferenças significativas ($p < 0,05$). O quociente foi considerado estável, em relação ao valor referência de 2,2% nas combinações, no entanto, ao comparar a combinação de Leucena+Gliricidia (L+G), que teve um maior qMic, com um valor de 7%, com as outras combinações, podemos afirmar que foram encontrados resultados inferiores, conseqüentemente, menor qualidade nutricional da MOS. Nesse caso, os baixos valores de qMic podem indicar que na presença do capim não ocorreu tanta imobilização de carbono na biomassa microbiana por meio do carbono total do solo. O quociente microbiano (qMic) está relacionado a qualidade da matéria orgânica. Isso indica que o uso de plantas de cobertura no solo, ainda é a melhor forma de manejo nos agroecossistemas, pois há o aporte de matéria orgânica e subsequente ciclagem de nutrientes, melhorias das condições físicas do solo e estímulo a comunidade biológica do solo, exercendo papel importante no incremento dos serviços ambientais (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

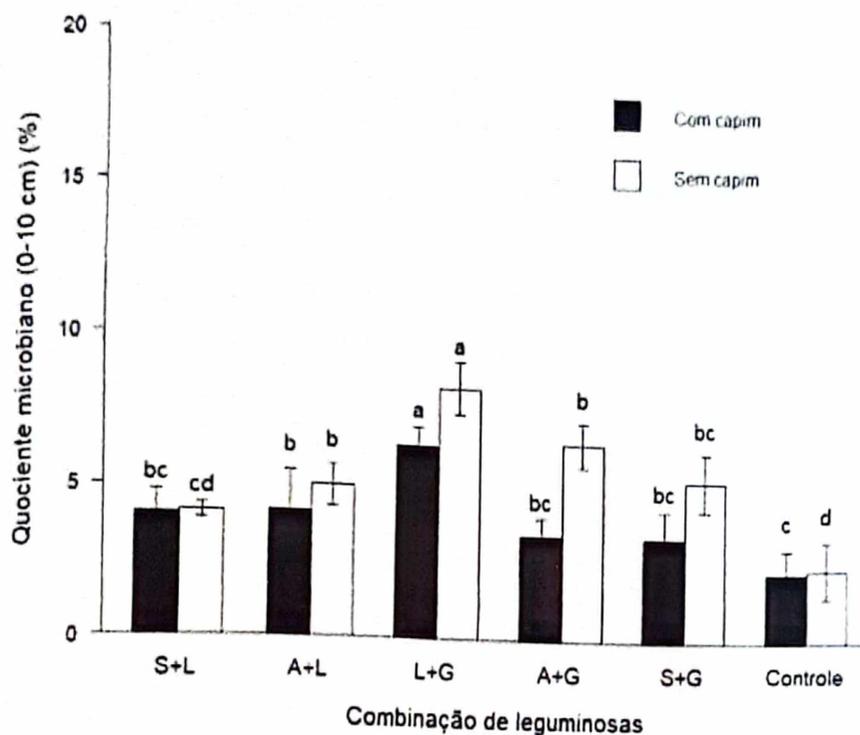


Figura 6 Valores do quociente microbiano (qMic) na profundidade de 0-10 cm , de um experimento em sistema de aleias , com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA. S+L = Sombreiro+Leucena ; A+L= Acácia+Leucena ; L+G= Leucena+Gliricidia ; A+G = Acácia+Gliricidia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

Quanto ao quociente microbiano sem a presença do capim Mombaça, também houve diferenças significativas ($p < 0,05$). Verificou-se que todas as combinações apresentaram valores maiores que o de referência , sendo na combinação de L+G que teve a maior atividade do qMic , assim como na presença do capim, no valor de 9% , em que as demais combinações variaram apenas em no máximo 3% abaixo dela. Isso demonstra que sem a presença da gramínea, a qualidade nutricional da matéria orgânica encontrada nas combinações de leguminosas pode ser considerada alta. Neste sentido, a provável resposta para os altos valores de qMic sem a presença do capim é que o aporte das leguminosas é a melhor condição para adicionar matéria orgânica ao solo. Além disso, segundo Diniz et al.(2014) , a menor relação C/N do solo encontrada nas leguminosas de alta qualidade pode ter disponibilizado mais nitrogênio à biomassa microbiana e imobilizado mais C e N em seu conteúdo celular, podendo ser um outro fator que possibilitou uma maior atividade do quociente microbiano.

Na camada de 10-20 cm do quociente microbiano (Figura 7) , quando teve a presença do capim Mombaça , houve diferenças significativas ($p < 0,05$) . A combinação L+G foi a que apresentou maior qMic , no valor de 9 % , seguido da combinação A+L , com 7% . Acredita-se que altos valores de qMic nesta profundidade de 10-20 cm pode ser resultado da maior reserva do carbono orgânico total no solo e conseqüentemente de uma matéria orgânica do solo de maior qualidade , permitindo com que a biomassa microbiana desse solo tenha mais carbono disponível para ser utilizado e convertido . Segundo Lisboa et al. (2012), maior qMic em maiores profundidades no plantio direto está relacionado ao menor acúmulo de carbono pelos microrganismos nesse local.

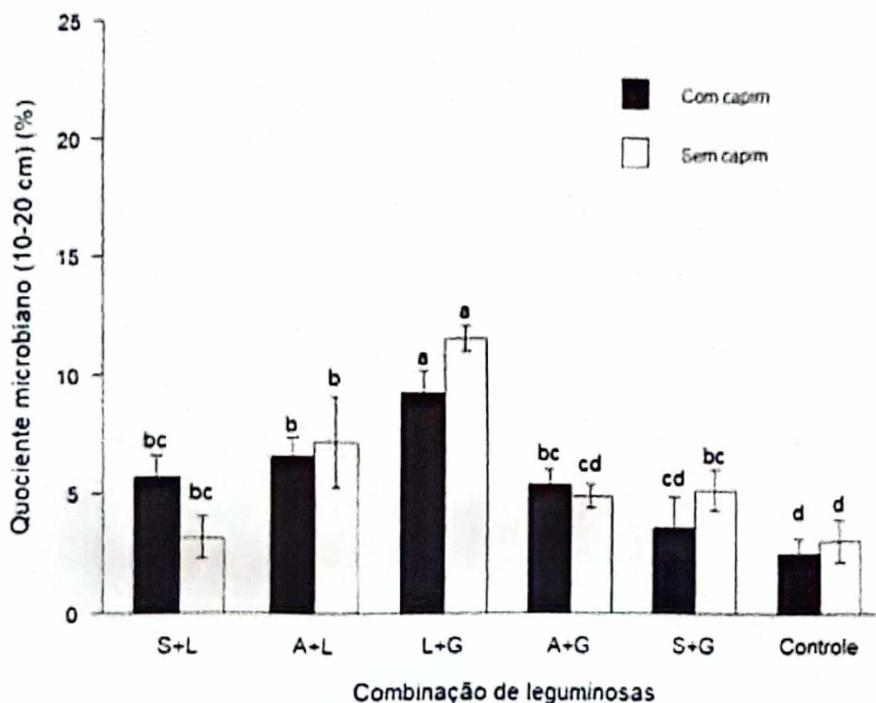


Figura 7 Valores do quociente microbiano (qMic) na profundidade de 10-20 cm , de um experimento em sistema de aleias , com e sem capim Mombaça , instalado na Universidade Estadual do Maranhão , em São Luis-MA. S+L = Sombreiro+Leucena ; A+L= Acácia+Leucena ; L+G= Leucena+Glicírcida ; A+G = Acácia+Glicírcida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

O qMic nas combinações sem a presença do capim também apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$). Quanto aos valores , assim como na presença do capim , foram as combinações L+G e A+L que tiveram maior percentual de qMic , com 12 e 7,4 % , respectivamente. Em contrapartida disso, a combinação S+L apresentou menor percentual , com apenas 3%. Segundo Gama-Rodrigues et al. (2008), valores mais baixos do quociente

microbiano podem ser justificados pela baixa qualidade nutricional da matéria orgânica, fazendo com o que a biomassa microbiana se torne incapaz de utilizar totalmente o carbono orgânico total.

Em solos de baixa disponibilidade de nutrientes, ou com baixa qualidade do substrato, ou qualquer outro fator de perturbação e limitação, a biomassa microbiana é incapaz de utilizar completamente o carbono orgânico total, provocando baixos valores de quociente microbiano (LEITE et al., 2013). De fato, em solos do trópico úmido que possuem baixa fertilidade natural, encontrar altos valores de q_{Mic} indica a eficiência do sistema em aleias. Nas combinações apenas com leguminosas, como foi o caso de L+G e A+L, foram mais eficientes para disponibilizar nutrientes para o solo, melhorar a estrutura e produtividade. Ao mesmo tempo que, provocam um aumento da necromassa microbiana, que ao se associar com cátion polivalente (cálcio), permite que o carbono seja estocado, o que pode causar uma possível estabilização da MOS, não sendo liberado gases do efeito estufa para a atmosfera, além de um provável aumento na eficiência do uso do carbono. Segundo Sinsabaugh et al. (2013), uma EUC alta implica em um aumento no potencial para sequestro de C em solos.

5.4 Atributo químico e carbono orgânico associado ao mineral (COAM)

Em relação a quantidade de cálcio (Ca) encontrada nesse estudo (Tabela 2), foi possível observar que em relação ao Ca ocorreram diferenças significativas ($p < 0,05$) nas duas profundidades. Na camada de 0-10 cm, na combinação L+G notou-se um maior valor do cátion polivalente, com $61,5 \text{ mmol m}^{-3}$. A Leucena e Gliricidia são leguminosas relatadas com baixa relação C/N e seus resíduos podem ter influenciado a maior quantidade de Ca nas amostras coletadas nessas parcelas experimentais. De acordo com Von Lützow et al. (2006), o efeito positivo da biomassa das leguminosas no conteúdo de cálcio pode ser explicado não apenas pela quantidade de nutrientes reciclados por elas, mas também pelo aumento da capacidade do solo de reter cátions, causados por compostos derivados da decomposição da biomassa. Com essa alta concentração de Ca na combinação L+G e o aumento da necromassa microbiana provocado por biomassa de alta qualidade, espera-se que ocorra uma estabilização da matéria orgânica do solo.

Na camada de 10-20 cm, o Ca se manteve alto na combinação de Leucena+Gliricidia com a presença e ausência do capim, no entanto, foi na combinação de A+L que ele se mostrou em maior quantidade, com $61,2 \text{ mmol m}^{-3}$. É provável que a combinação com uma leguminosa

de alta qualidade possa ter provocado um valor mais expressivo de cálcio nessa camada. O cálcio é um componente essencial dos microrganismos e como tal pode influenciar o crescimento e a atividade da população microbiana, influenciando, em consequência, inúmeros processos metabólicos importantes nas transformações dos elementos no solo, favorecendo ou não a disponibilidade dos nutrientes para as plantas (NAHAS; DELFINO; ASSIS ., 1997). Nesse sentido, a ligação entre cátions polivalentes e grupos funcionais com matéria orgânica carregada negativamente seria menos acessível para atividade microbiana, o porquê da importância do cálcio nesse processo (WHITTINGHILL e HOBBIE 2012).

Tabela 2 – Atributo químico (Cálcio) e carbono orgânico associado ao mineral (COAM) no solo, 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.

Combinação de biomassas aplicadas	Profundidade 0-10 cm		Profundidade 10-20 cm	
	Ca	COAM	Ca	COAM
	mmolc m ⁻³	g dm ⁻¹	mmolc m ⁻³	g dm ⁻¹
L+G+M	61,1 a	8.98 a	60,1 a	9.31 a
L+G	61,5 a	8.84 a	59,5 a	10.01 a
S+G+M	60 b	7.61 ab	59,5 a	5.48 c
S+G	58,9 b	8.82 a	56,3 b	5.22 bc
S+L+M	57,2 b	6.89 b	51 b	7.58 ab
S+L	59,8 b	6.35 bc	55,1 b	6.71 cd
A+G+M	59,9 b	6.41 bc	56,8 b	6.03 abc
A+G	58,1 b	7.94 ab	57,4 b	8.07 ab
A+L+M	61,4 a	8.14 ab	60 a	8.79 abc
A+L	61,1 a	6.48 bc	61,2 a	4.89 d
C+M	48,7 c	4.55 c	46,8 c	3.18 bc
C	47 c	4.05 c	44,5 c	4.1 d
CV(%)	6.99	12.82	12.21	15.09

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.

Carbono orgânico associado ao mineral (COAM) 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).

Na camada de 0-10 cm do carbono orgânico associado ao mineral (Tabela 2) , na presença e ausência do capim Mombaça , teve diferenças significativas ($p < 0,05$). 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 , podem ter causado um maior valor do COAM nas combinações de L+G+M e L+G , com $8,98 \text{ g kg}^{-1}$ e $8,84 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente.

Segundo Tiecher (2016) , as gramíneas apresentam maior relação C/N e a decomposição dos resíduos sobre o solo é mais lenta. Sendo assim, se por um lado a liberação de nutrientes será mais lenta, por outro, os resíduos do solo permanecem na superfície por mais tempo, aumentando a sua proteção , o que pode ter influenciado no conteúdo de carbono orgânico associado ao mineral da combinação L+G+M na superfície.

Na camada de 10-20 cm do carbono orgânico associado ao mineral , tanto na presença do capim Mombaça quanto na ausência , houve diferenças significativas ($p < 0,05$). Verificou-se que foram nas combinações L+G+M e L+G que teve um maior conteúdo de COAM , sendo em L+G o maior valor , com $10,01 \text{ g kg}^{-1}$. Portanto , a alta qualidade da Leucena e Gliricídia , pode provocar um aumento da necromassa microbiana e uma possível estabilização da matéria orgânica do solo nesse sistema , principalmente ao interagir com o cátion polivalente (cálcio).

Nas condições do trópico úmido, as áreas com leguminosas sequestram mais C em relação ao controle, por isso tem se recomendado o uso de sistemas de aleias nos trópicos, por ter um potencial evidente para capturar e armazenar grandes quantidades de carbono na biomassa e nos solos em comparação com pastagens e monocultura (NAIR et al., 2009). Desta maneira , o carbono estocado indica redução da emissão de CO₂ para a atmosfera e um consequente aumento na eficiência do uso do carbono do sistema , o que se espera que ocorra a partir do aumento da fração estável da matéria orgânica do solo.

6 CONCLUSÃO

Nossos resultados confirmam a hipótese de que biomassa de alta qualidade potencializa os mecanismos impulsionadores da estabilização da MOS. A variação dos coeficientes biológicos, causou um aumento da necromassa microbiana e levou a um maior conteúdo 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 e diminuir a emissão dos gases do efeito estufa para a atmosfera.

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.

AGUIAR, A.D.C.F.; CANDIDO, C.S.; CARVALHO, C.S.; MONROE, P.H.M.; MOURA, E.G. Organic matter fraction and pools of phosphorus as indicators of the impact of land use in the Amazonian periphery. **Ecological Indicators**, v. 30, p. 158–164, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.02.010>.

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, A. L. Atividade enzimática de fosfatase e b-glicosidase em solo de diferentes culturas. **Encontro Anual da Biofísica**, p. 58-59, 2018.
<https://doi.org/10.5151/biofisica2018-020>.

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.

ALVES, T. F. D. **Efeito dos exsudados radiculares na mineralização de resíduos orgânicos aplicados ao solo**, 2009, 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente – Tecnologias Ambientais) – Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 2009.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K.H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology Biochemistry**, v. 25, p.393-395, 1993

ANDRADE, V. S.; VIEIRA, E. S.; PINHEIRO, S. S. C.; PERIN, L.; MENEZES, V. M. M. Respiração e biomassa microbiana em área de cultivo de cana-de-açúcar. **Cadernos de Agroecologia**, v. 15, n. 10, 2020.

ARAÚJO, T. D. S.; GALLO, A. D. S.; ARAÚJO, 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.

BALOTA, E. L.; MACHINESKI, O.; HAMID, K. I. A.; YADA, I. F. U.; BARBOSA G. M. C.; NAKATANI, A. S. et al. Soil microbial properties after long-term swine slurry application to conventional and no-tillage systems in Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 490, p. 397-404, 2014.

BARRETO, P. A. B.; GAMA-RODRIGUES, E. F. D.; GAMA-RODRIGUES, A. C. D.; BARROS, N. F. D.; FONSECA, S. Atividade microbiana, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana em plantações de Eucalipto, em sequência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 2, p. 611-619, 2008.

BARTLETT, R. J.; ROSS, D. S. Colorimetric determination of oxidizable carbon in acid soil solutions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, n. 4, p. 1191-1192, 1988.

BASTIDA, F.; ZSOLNAY, A.; HERNÁNDEZ, T.; GARCÍA, C. Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. **Geoderma**, v. 147, n. 3-4, p. 159-171, 2008.

BONATO, V. **Efeito da adubação nitrogenada ao longo do pastejo da aveia na biomassa microbiana em sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) em Curitiba-SC.2021**. Monografia (Bacharelado em Agronomia). Departamento de Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Catarina, Curitiba. 2021.

BROOKES, P. C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. **Biology and Fertility of soils**, v. 19, n. 4, p. 269-279, 1995.

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.

CASIDA JR, L. E.; KLEIN, D. A.; SANTORO, Thomas. Soil dehydrogenase activity. **Soil science**, v. 98, n. 6, p. 371-376, 1964.

CERETTA, C. A.; DURIGON, R.; BASSO, C. J.; BARCELLOS, L. A. R.; VIEIRA, F. C. B. Características químicas de solo sob aplicação de esterco líquido de suínos em pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 729-735, 2003.

CHEN, X.; XIA, Y.; RUI, Y.; NING, Z.; HU, Y.; TANG, H.; SU, Y. Microbial carbon use efficiency, biomass turnover, and necromass accumulation in paddy soil depending on fertilization. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 292, p. 106816, 2020.

CHENU, C.; ANGERS, D. A.; BARRÉ, P.; DERRIEN, D.; ARROUAYS, D.; BALESSENT, J. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. **Soil and Tillage Research**, v. 188, p. 41-52, 2019.

CHERUBIN, M. R.; EITELWEIN, M. T.; FABBRIS, C.; WEIRICH, S. W.; SILVA, R. F.; SILVA, V. R.; BASSO, C. J. Qualidade física, química e biológica de um Latossolo com diferentes manejos e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 615-625, 2015.

CHILDS, G. M. F.; **Efeitos de herbicidas na microbiota do solo em sistema fechado**. 2007 .70 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP , 2007.

CORREIA, M. E. F.; ANDRADE, A. D. Formação de serapilheira e ciclagem de nutrientes. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, p. 197-225, 1999.

CUNHA, T. J.; MENDES, A. M. S.; GIONGO, V. **Matéria orgânica do solo**. Embrapa, capítulo 9, p. 273-293, 2015.

DA COSTA , M. B.; DA COSTA, B. **Adubacao verde no sul de Brasil**. Ríó de Janeiro, 1991, 350 p.

DE ANDRADE, M. C. D. C.; DA SILVA, A. F. A.; DA SILVA LIMA, R. Cultivo em aléias: uma alternativa para pequenos agricultores. **AGROPECUÁRIA CIENTÍFICA NO SEMIÁRIDO**, v. 8, n. 3, p. 18-21, 2012.

DE ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 3, 2007.

DE MENDONÇA, E. S.; DA MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. UFV, Viçosa, Minas Gerais, 2005.

DE OLIVEIRA SILVA, M.; DOS SANTOS, M. P.; DA PAZ SOUSA, A. C.; DA SILVA, R. L. V.; DE MOURA, I. A. A.; DA SILVA, R. S.; DA SILVA COSTA, K. D. Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 6853-6875, 2021.

DE SOUZA DORNELLES, H.; MATSUOKA, M.; BINELO, L. A.; PAUVELS, L. A.; CARON, C. M.; DA SILVA, V. R. Biomassa e atividade microbiana de solos com aplicação de resíduo sólido urbano e dejetos líquidos de suínos. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)**, n. 44, p. 18-26, 2017.

DEMISIE, WALELIGN.; LIU, ZHAOYUN.; ZHANG, MINGKUI. Effect of biochar on carbon fractions and enzyme activity of red soil. **Catena**, v. 121, p. 214-221, 2014.

DINIZ, L. T.; RAMOS, M. L. G.; VIVALDI, L. J.; DE ALENCAR, C. M.; JUNQUEIRA, N. T. V. Alterações microbianas e químicas de um Gleissolo sob macaubeiras nativas em função da variação sazonal e espacial. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 3, 2014.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. **Defining soil quality for a sustainable environment**, v. 35, p. 1-21, 1994.

DOS REIS JUNIOR, F. B.; MENDES, I. D. C. Biomassa microbiana do solo. **Embrapa Cerrados-Documents (INFOTECA-E)**, 2007.

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.

- EVANS JR, A. ; ZELAZNY, L. W.; ZIPPER, C. E. Solution parameters influencing dissolved organic carbon levels in three forest soils. **Soil Science Society of America Journal**. v. 52, n. 6, p. 1789-1792, 1988.
- FERNANDES, M. M.; SILVA, M. D.; VELOSO, M. E. C.; OLIVEIRA, T. M.; FERNANDES, M. R. M.; SAMPAIO, F. M. T. Biomassa microbiana e matéria orgânica em áreas desertificadas revegetadas com pinhão-manso solteiro e consorciado com gramínea no Sui do Piauí. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, p. 464-469, 2013.
- FERREIRA, E. A.; FIALHO, C. M. T.; BIBIANO, C. S.; BRAGA, R. R.; PEREIRA, G. A. M.; SILVA, D. V.; SANTOS, J. B. Atividade microbiana de solos cultivados com mandioca em sistema de policultivo. **Magistra**, Cruz das Almas – BA, n. 27, n.3/4, p. 406-411, 2015.
- FIALHO, C. M. T.; SILVA, A. A.; MELO, C. A. D.; COSTA, M. D.; SOUZA, M. W. R.; REIS, L. A. C. Weed Interference in Soybean Crop Affects Soil Microbial Activity and Biomass. **Planta Daninha**, v. 38, p. 1-6, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-83582020380100046>.
- FLEMMING, H. C. EPS—then and now. **Microorganisms**, v. 4, n. 4, p. 41, 2016.
- 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.
- GAMA-RODRIGUES, E. F. D.; GAMA-RODRIGUES, A. C. D.; PAULINO, G. M.; FRANCO, A. A. Atributos químicos e microbianos de solos sob diferentes coberturas vegetais no norte do Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1521-1530, 2008.
- GHANI, A.; DEXTER, M.; PERROTT, K.W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation. **Soil biology and biochemistry**, v. 35, p. 1231–1243, 2003.
- GRAHAM, M.H.; HAYNES, R.J.; MEYER, J.H. Soil organic matter content and quality: effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a longterm sugarcane experiment in South Africa. **Soil Biology and Biochemistry**, v.34, p.93-102, 2002.
- GUARESCHI, R.F.; PEREIRA, M.G.; PERIN, A. Oxidizable carbon fractions in Red Latosol under different management systems. **Revista Ciência Agronômica**, 44:242-250, 2013.
- HARTEMINK, A. E.; GERZABEK, M. H.; LAL, R.; MCSWEENEY, K. Soil carbon research priorities. In: **Soil carbon**. Springer, Cham, 2014. p. 483-490.
- HATCH, D.; LOWEL, R.D.; ANTIL, R.S.; JARVIS, S.C.; OWEN, P.M. Nitrogen mineralization and microbial activity in permanent pastures amended with nitrogen fertilizer or dung. **Biology and Fertility of soils**, v. 30, n. 4, p. 288-293, 2000.
- HAYNES, R.J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, p. 211–219, 2000.

- HEGER, T. J.; IMFELD, G.; MITCHELL, E. A. Special issue on "Bioindication in soil ecosystems": Editorial note. **European Journal of Soil Biology**, n. 49, p. 1-4, 2012.
- HUANG, J.; SONG, C. Effects of land use on soil water soluble organic C and microbial biomass C concentrations in the Sanjiang Plain in northeast China. **Acta Agriculturae Scandinavica Section B—Soil and Plant Science**, v. 60, n. 2, p. 182-188, 2010.
- IGUE, K.; PAVAN, M. A. Uso eficiente de adubos orgânicos. In: **SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA**. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, p. 338-418, 1984.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 79, n. 1, p. 9-16, 2000.
- JAT, H. S.; DATTA, A.; CHOUDHARY, M.; SHARMA, P. C.; DIXIT, B.; JAT, M. L. Soil enzymes activity: Effect of climate smart agriculture on rhizosphere and bulk soil under cereal based systems of north-west India. **European journal of soil biology**, v. 103, p. 103292, 2021.
- JENKINSON, DAVID S.; POWLSON, DAVID S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V: a method for measuring soil biomass. **Soil biology and Biochemistry**, v. 8, n. 3, p. 209-213, 1976.
- 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.
- 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.
- KIEHL, E.J. **Adubação orgânica: 500 perguntas e respostas**. Piracicaba: Edmar José Kiehl, 227p, 2005.
- KUZYAKOV, Y.; GAVRICHKOVA, O. Time lag between photosynthesis and carbon dioxide efflux from soil: a review of mechanisms and controls. **Global Change Biology**, v. 16, n. 12, p. 3386-3406, 2010.
- LACERDA, K.A.P.; CORDEIRO, M.A.S.; VERGINASSI, A.; SALGADO, F.H.M. PAULINO, H.B. & CARNEIRO, M.A.C. Organic carbon, biomass and microbial activity in an Oxisol under different management systems. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 56, n. 3, p. 249-254, 2013.
<http://dx.doi.org/10.4322/rca.2013.036>
- 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.

LEITE, L.F.C.; ARRUDA, F.P.; COSTA, C.N.; FERREIRA, J.S.; HOLANDA, M.R.N. Qualidade química do solo edinâmica de carbono sob monocultivo e consórcio de macaúba e pastagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.1257-1263, 2013.

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.

LI, Z.; TIAN, D.; WANG, B.; WANG, J.; WANG, S.; CHEN, H. Y.; NIU, S. Microbes drive global soil nitrogen mineralization and availability. **Global change biology**, v. 25, n. 3, p. 1078-1088, 2019.

LIANG, B. C.; MACKENZIE, A. F.; SCHNITZER, M.; MONREAL, C. M.; VORONEY, P. R.; BEYAERT, R. P. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils. **Biology and fertility of soils**, v. 26, n. 2, p. 88-94, 1997.

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; SILVEIRA, A. O. D.; MARTINS, A. F.; SELBACH, P. A. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 45-55, 2012. DOI: 10.1590/S0100-

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.

MAO, R.; ZENG, D. H.; AI, G. Y.; YANG, D.; LI, L. J.; LIU, Y. X. Soil microbiological and chemical effects of a nitrogen-fixing shrub in poplar plantations in semi-arid region of Northeast China. **European Journal of Soil Biology**, v. 46, n. 5, p. 325-329, 2010.

MASCIANDARO, G.; CECCANTI, B.; GALLARDO-LANCHO, J. F. Organic matter properties in cultivated versus set-aside arable soils. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 67, n. 2-3, p. 267-274, 1998.

MASTO, R. E.; CHHONKAR, P. K.; SINGH, D.; PATRA, A. K. Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 118, n. 1-4, p. 130-142, 2007.

MEDEIROS, E.; CAVALCANTE, F.; SILVA, V.; SILVEIRA, S. C.; MARTINS, C. DIVERSIDADE CULTURAL DE CEPAS DE ACTINOBACTÉRIAS DO SEMIÁRIDO. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, n. 27, 2018.

MELO, L. C. A.; SILVA, C. A.; DIAS, B. D. O. Caracterização da matriz orgânica de resíduos de origens diversificadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 101-110, 2008.

MENDES, I. D. C.; DA CUNHA, M. H.; DOS REIS JUNIOR, F. B.; FERNANDES, M. F.; CHAER, G. M.; MERCANTE, F. M.; ZILLI, J. E. **Bioindicadores para avaliação da qualidade dos solos tropicais: utopia ou realidade?**. Embrapa Cerrados-Documentos (INFOTECA-E), 2009.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2ª Edição. Editora da Universidade Federal de Lavras. 729p, 2006.

MOSCATELLI, M. C.; SECONDI, L.; MARABOTTINI, R.; PAPP, R.; STAZI, S. R., MANIA, E. & MARINARI, S. Assessment of soil microbial functional diversity: land use and soil properties affect CLPP-MicroResp and enzymes responses. **Pedobiologia**, v. 66, p. 36-42, 2018.

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.; 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.

NAHAS, E.; DELFINO, J. H.; ASSIS, L. C. Atividade microbiana e propriedades bioquímicas do solo resultantes da aplicação de gesso agrícola na cultura do repolho. **Scientia Agricola**, v. 54, n. 3, p. 160-166, 1997.

NAIR, R.P.K.; MOHAN, K.B.; NAIR, V.D. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.172, p. 10-23, 2009.

- PARTEY, S. T.; QUASHIE-SAM S. J. Decomposition and nutrient release patterns of the leaf biomass of the wild sunflower (*Tithonia diversifolia*): a comparative study with four leguminous agroforestry species. *Agroforestry Systems*, v.81, p.123-134, 2011.
- PEZARICO, C. R.; VITORINO, A. C. T.; MERCANTE, F. M.; DANIEL, O. Indicadores de qualidade de solos em sistemas agroflorestais. *Revista Ciências Agrárias*, v. 56, n. 1, p. 40-47, jan./mar. 2013.
- 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.
- POWER, A. G. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences*, v. 365, n. 1554, p. 2959-2971, 2010.
- POZZA, L. E.; FIELD, D. J. The science of soil security and food security. *Soil Security*, v. 1, p. 100002, 2020.
- PRADO, R. B.; FIDALGO, E. C. C.; MONTEIRO, J. M. G.; SCHULER, A. E.; VEZZANI, F. M.; GARCIA, J. R.; SIMÕES, M. Current overview and potential applications of the soil ecosystem services approach in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, p. 1021-1038, 2016.
- QUINKENSTEIN, A.; WOLLECKE, J.; BOHM, C.; GRUNEWALD, H.; FREESE, D.; SCHNEIDER, B.U.; HUTTL, R.F. Ecological benefits of the alley cropping agroforestry system in sensitive regions of Europe. *Environmental Science and Policy*, v.12, p.1112-1121, 2009.
- RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- RAMOS, F. T., DORES, E. F. G. C., WEBER, O. L. S., BEBER, D. C; CAMPELO Jr, J. H., MAIA, J. C. S., 2018. Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. – 98 (9)
- RATCLIFFE, S.; BOSMAN, B.; CARNOL, M. Spatial and temporal variability of biological indicators of soil quality in two forest catchments in Belgium. *Applied Soil Ecology*, v. 126, p. 148-159, 2018.
- RENELLA, G.; MENCH, M.; LANDI, L.; NANNIPIERI, P. Microbial activity and hydrolase synthesis in long-term Cd-contaminated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 37, n. 1, p. 133 -139, 2005.~
- ROCHA, G. N.; GONÇALVES, J. L. M.; MOURA, I. M. Mudanças da fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com bio-sólido. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28:623-639, 2004.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. D. A. **Fracionamento físico do solo em estudos de matéria orgânica**. Embrapa Agropecuária Oeste-Livro técnico (INFOTECA-E), 2002.

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

SAMPAIO, D. B.; ARAÚJO, A. S. F. D.; SANTOS, V. B. D. Avaliação de indicadores biológicos de qualidade do solo sob sistemas de cultivo convencional e orgânico de frutas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 353-359, 2008.

SAVIOZZI, A.; BUFALINO, P.; LEVI-MINZI, R.; RIFFALDI, R. Biochemical activities in a degraded soil restored by two amendments: a laboratory study. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, n. 2, p. 96-101, 2002.

SCHLESINGER, W. H. Carbon sequestration in soils: some cautions amidst optimism. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 82, n. 1-3, p. 121-127, 2000.

SCHMIDT, M. W.; TORN, M. S.; ABIVEN, S.; DITTMAR, T.; GUGGENBERGER, G.; JANSSENS, I. A.; TRUMBORE, S. E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**, v. 478, n. 7367, p. 49-56, 2011.

SILVA, A. N. **Desempenho agrônomo 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, Brasília, 2017.

SILVA, E. E.; DE AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂). **Embrapa Agrobiologia-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2007.

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, M. B.; KIEMANN, H. J.; SILVEIRA, P. M.; LANNA, A. C. Atributos biológicos do solo sob influência da cobertura vegetal e do sistema de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n.12, p. 1755-1761, 2007.

SILVA, R. R. D.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. D. S.; CURTI, 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.

SINSABAUGH, R. L.; MANZONI, S.; MOORHEAD, D. L.; RICHTER, A. Carbon use efficiency of microbial communities: stoichiometry, methodology and modelling. **Ecology letters**, v. 16, n. 7, p. 930-939, 2013.

SOUZA, E. A. **Plantio direto na palha de leguminosas como estratégia para melhorar a eficiência de uso de nutrientes em milho Qpm**, 2012, 65 f. Dissertação (Mestrado em Agroecologia) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luis, 2013.

SPOHN, M.; KLAUS, K.; WANER, 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.

SRINIVASA RAO, C.; GROVER, M.; KUNDU, S.; DESAI, S. Soil Enzymes. *Encyclopedia of Soil Science*, 3rd ed.; Lal, R., Ed. p. 2100-2107, 2017.

STARK, C.H.; CONDRON, L.M.; O'CALLAGHAN, M.; STEWART, A.; DI, H.J. Differences in soil enzyme activities, microbial community structure and shortterm nitrogen mineralisation resulting from farm management history and organic matter amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 40:1352-1363, 2007.

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.

STÖCKER, C.M; MONTEIRO, A.B; BAMBERG, A.L; CARDOSO, J.H; MORSELLI, T.B.G.A; LIMA, A.C. R. Bioindicadores da qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **14ª Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa**, 2017.

STOCKER, THOMAS F. The Ocean as a Component of the Climate System. In: *International Geophysics*, v. 3, f. 452, 2013. 904 p.

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.

TIECHER, T. **Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água**. Porto Alegre : UFRGS, 2016.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. *Tópicos em ciência do solo*, v. 2, n. 3, p. 195-276, 2002.

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.

VISSER, S.; PARKINSON, D. Soil biological criteria as indicators of soil quality: soil microorganism. *American Journal of Alternative Agriculture*, Greenbelt, v. 7, n. 1, p.33-37, 1992.

- 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.
- WARDLE, D. A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. **Biological reviews**, v. 67, n. 3, p. 321-358, 1992.
- 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.
- WIEDER, W. R.; BONAN, G. B.; ALLISON, S. D. Global soil carbon projections are improved by modelling microbial processes. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 10, p. 909-912, 2013.
- 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.
- 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.
- ZAMULINA, I. V.; GOROVTSOV, A. V.; MINKINA, T. M.; MANDZHIEVA, S. S.; BAUER, T. V.; BURACHEVSKAYA, M. V. The influence of long-term Zn and Cu contamination in Spolic Technosols on water-soluble organic matter and soil biological activity. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 208, p. 111471, 2021.
- 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.