



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - CCA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOLOGIA - PPGA

PEDRO HENRIQUE NEVES DOS SANTOS

**ESTABILIZAÇÃO DO CARBONO ORGÂNICO EM FUNÇÃO DE BIOMASSAS DE
DIFERENTES QUALIDADES APLICADAS EM UM SOLO ENRIQUECIDO COM
CÁLCIO**

São Luís - MA
Setembro – 2022

PEDRO HENRIQUE NEVES DOS SANTOS

**ESTABILIZAÇÃO DO CARBONO ORGÂNICO EM FUNÇÃO DE BIOMASSAS DE
DIFERENTES QUALIDADES APLICADAS EM UM SOLO ENRIQUECIDO COM
CÁLCIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agroecologia da Universidade Estadual do Maranhão, como pré-requisito para a obtenção do título de Mestre em Agroecologia.

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura

São Luís - MA
Setembro – 2022

Santos, Pedro Henrique Neves dos.

Estabilização do carbono orgânico em função de biomassas de diferentes qualidades aplicadas em um solo enriquecido com cálcio / Pedro Henrique Neves dos Santos. – São Luís, 2022.

51 f

Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Agroecologia) - Universidade Estadual do Maranhão, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura.

1.Estabilização de C. 2.Carbono - Estoque. 3.Solo orgânico. 4.Leguminosas. I.Título.

CDU: 631.417.1

PEDRO HENRIQUE NEVES DOS SANTOS

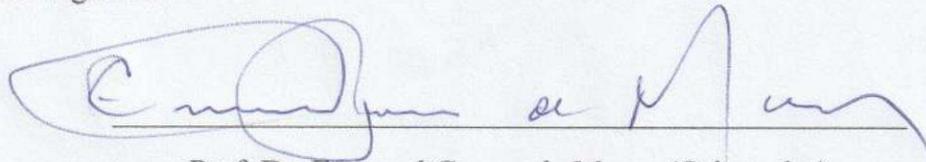
**ESTABILIZAÇÃO DO CARBONO ORGÂNICO EM FUNÇÃO DE BIOMASSAS DE
DIFERENTES QUALIDADES APLICADAS EM UM SOLO ENRIQUECIDO COM
CÁLCIO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agroecologia da Universidade Estadual do Maranhão, para a obtenção do título de Mestre em Agroecologia.

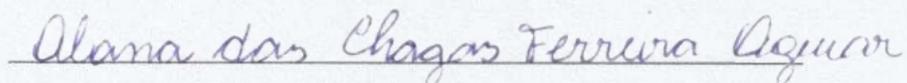
Orientador: Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura

Aprovado em: 29 / 09 / 2022

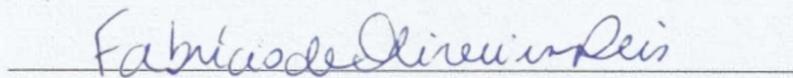
Comissão Julgadora:



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



Profª. Dra. Alana das Chagas Ferreira Aguiar
Universidade Federal do Maranhão



Prof. Dr. Fabrício de Oliveira Reis
Universidade Estadual do Maranhão

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Carmen e Neyovan, pelo apoio, inspiração de luta e determinação. Aos meus irmãos, Djalma Neves e Gabriel Neves, pelos quais tenho grande admiração.

Agradeço à minha namorada, Águida Oliveira, por todo o amor, apoio, paciência, incentivo e companheirismo.

Agradeço às minhas amigas de pós-graduação, Kalyne e Dyane, pelo apoio, ajuda e incentivos durante as práticas de campo e laboratório. Obrigado! Aos amigos da graduação em agronomia, em especial Edésio Cunha e Cinthya, que ajudaram em maior parte das atividades de campo e laboratório.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Emanuel Gomes de Moura, pelas orientações, paciência e disponibilidade em ajudar durante a minha formação.

Aos professores Heder Braun, Alana Chagas e Fabrício de Oliveira pela disponibilidade em ajudar.

Aos funcionários da UEMA, em especial Neto, por ajudar em grande parte nas atividades de campo resolver problemas práticos durante a condução do experimento.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão – FAPEMA.

RESUMO

A disponibilização de carbono para solo por meio de resíduos da poda de leguminosas cultivadas em sistemas de aléias é uma promissora alternativa ao sistema de cultivo tradicional. O sistema de aléias modificado da área experimental apresentava leguminosas já estabelecidas, onde utilizou-se uma espécie nativa (*Clitoria fairchildiana*), três exóticas (*Acacia mangium*, *Leucaena leucocephala* e *Gliricidia sepium*) e uma forrageira (*Panicum maximum*, cv. Mombaça). Foi avaliado o efeito da mistura da biomassa de leguminosas com diferentes qualidades de resíduos na estabilização de carbono no solo, atividade biológica, resistência do solo à penetração e conteúdo de cátions. Foi realizado o plantio de milho em consórcio com as leguminosas, e a produtividade da cultura serviu como indicador da qualidade e estabilidade de C do solo nos diferentes tratamentos. O delineamento utilizado foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos foram organizados a partir da aplicação dos resíduos da poda da seguinte forrageira e leguminosas: Mombaça (**M**); Sombreiro + Leucena (**S+L**); Acácia + Leucena (**A+L**); Leucena + Gliricídia (**L+G**); Acácia + Gliricídia (**A+G**); Sombreiro + Gliricídia (**S+G**); e Controle, com solo descoberto. A aplicação de resíduos de biomassas de diferentes qualidades influenciou, positivamente, o conteúdo de cálcio e magnésio na camada superficial do solo, assim como os teores de carbono orgânico e atividade microbiológica do solo na maioria das variáveis analisadas, com diferenças estatísticas em relação ao controle. Maior parte dos tratamentos em aléias exibiram maiores resultados de produtividade quando comparados com o controle, principalmente o tratamento S+G (Sombreiro + Gliricídia). O capim Mombaça não apresentou diferenças estatísticas em relação ao controle em todas as variáveis estudadas.

Palavras-chave: estabilização de C, Estoque de carbono orgânico do solo, leguminosas.

ABSTRACT

Making carbon available to the soil through pruning residues of legumes cultivated in alley crop systems is a promising alternative to the traditional cultivation system. The modified alley system in the experimental area had already established legumes, where a native species (*Clitoria fairchildiana*), three exotics (*Acacia mangium*, *Leucaena leucocephala* and *Gliricidia sepium*) and a forage species (*Panicum maximum*, Mombasa) were used. The effect of mixing legume biomass with different residue qualities on soil carbon stabilization, biological activity, soil resistance to penetration and cation content was evaluated. Maize was planted intercropped with legumes and crop productivity served as an indicator of the quality and stability of soil C in the different treatments. The design used was randomized blocks, with four replications. The treatments were organized from the application of pruning residues of the following forage and legumes: Mombasa (M); Sombreiro + Leucaena (S+L); Acacia + Leucaena (A+L); Leucaena + Gliricidia (L+G); Acacia + Gliricidia (A+G); Sombreiro + Gliricidia (S+G); and Control, with bare ground. The application of biomass residues of different qualities positively influenced the content of calcium and magnesium in the layer surface of the soil, as well as the levels of organic carbon and microbiological activity of the soil in most of the analyzed variables, with statistical differences in relation to the control. Most of the treatments in alleys showed higher productivity results when compared to the control, mainly the S+G treatment (Sombreiro + Gliricidia). The Mombasa grass did not present statistical differences in relation to the control in all the studied variables.

Keywords: C stabilization, soil organic carbon stock, leguminous trees.

LISTA DE SIGLAS

ACP – Análise dos componentes principais
CBM – Carbono da biomassa microbiana
COAM – Carbono orgânico associado ao mineral
COP – Carbono orgânico particulado
COS – Carbono orgânico do solo
COT – Carbono orgânico total
ECS – Estoque de Carbono orgânico
Mg – Megagrama
MOS – Matéria orgânica do solo
Mp – Megapascal
qMic – Quociente microbiano
qCo₂ – Quociente metabólico do solo
RBS – Respiração basal do solo
RP – Resistência do solo à penetração
SB – Soma de bases

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de tratamentos da área experimental	22
Figura 2 - Indicadores biológicos da atividade do solo.....	27
Figura 3 - Resistencia do solo à penetração (Mpa) após 6 dias sem chuva.....	30
Figura 4 - Análise dos componentes principais.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quantidade da matéria seca da combinação de leguminosas aplicadas no solo em 2021	22
Tabela 2. Conteúdo de carbono orgânico do solo (COS): carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM), carbono orgânico total (COT), matéria orgânica do solo e estoque de carbono no solo (ECS) na camada de 0-20 cm	28
Tabela 3. Análise química do solo (mmolc/dm ³) e soma de bases nos diferentes tratamentos a 0-20 cm de profundidade.....	31
Tabela 4. Componentes de produtividade do milho	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 Geral.....	14
2.2 Específicos.....	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1 Indicadores Biológicos da qualidade do solo.....	14
3.2 Importância da Matéria Orgânica no Solo.....	15
3.3 Eficiência do uso de Carbono.....	17
3.4 Interação entre cátions polivalentes e matéria orgânica para a estabilização do COS.....	19
3.5 Sistema de Cultivo em Aléias Modificado.....	20
4. MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1 Caracterização da área experimental.....	20
4.2 Indicadores Biológicos da Qualidade do Solo.....	22
4.3 Análise Química e da Matéria Orgânica do Solo.....	24
4.4 Propriedades Físicas do Solo.....	25
4.5 Determinação dos Componentes de Produtividade.....	25
4.6 Análises Estatísticas.....	26
5 RESULTADOS	27
5.1 Indicadores Biológicos da Qualidade do Solo.....	26
5.2 Frações de Carbono Orgânico no Solo.....	28
5.3 Resistência do Solo à Penetração.....	29
5.4 Análise Química do Solo.....	30
5.5 Componentes de Produtividade do Milho.....	31
5.6 Análise dos Componentes Principais (ACP).....	33
6 DISCUSSÃO	35
6.1 Indicadores Biológicos da Qualidade do Solo.....	34
6.2 Frações de Carbono Orgânico no Solo.....	35
6.3 Resistência do Solo à Penetração.....	36
6.4 Análise Química do Solo.....	37
6.5 Componentes de Produtividade do Milho.....	38
6.6 Análise dos Componentes Principais (ACP).....	40
7 CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é caracterizado por sua grande diversidade de solos, que variam de acordo com o clima, vegetação, material de origem, biota e relevo. Relacionado a essa diversidade, há grandes potenciais ou limitações em relação ao uso do solo, e essa diversidade é acentuada de acordo com diferenças regionais em termos de ocupação, uso e manejo da terra, que podem causar diferentes processos de erosão (GUERRA *et al.*, 2017).

No centro norte maranhense, os solos são propensos à degradação, isso se deve à baixa capacidade do solo em reter cátions, predisposição do solo à coesão, decomposição acelerada da matéria orgânica do solo e alto nível de intemperização, fatores que afetam sobretudo a produção agrícola familiar na região. Além desses solos estarem localizados em ambiente ecologicamente vulnerável, há uma predominância da agricultura itinerante, principalmente o sistema de corte e queima, no qual se pratica curtos períodos de cultivo e pousio de forma alternada, fatores que intensificam a baixa aptidão agrícola dos solos. Esse sistema de cultivo influencia a dinâmica da matéria orgânica no solo, assim como as dimensões físicas, químicas e biológicas da qualidade do solo, contribui para a degradação do solo e faz com que produções agrícolas e pecuárias se tornem insustentáveis (MOURA *et al.*, 2008; DOS SANTOS *et al.*, 2018)

O estoque de carbono no solo pode variar significativamente dependendo das práticas de manejo, uso da terra e características intrínsecas do solo, o cultivo sucessivo em solos com a retirada contínua da produção e sem a reposição de resíduos vegetais podem também aumentar a degradação do solo. Isto pode ser observado por meio de um declínio significativo nos teores de matéria orgânica e drenagem em solos de textura arenosa a média, e regiões com temperatura média elevada e umidade entre 50% e 60% (ALEXANDER, 1977; GROSS; HARRISON, 2019; AMELUNG *et al.*, 2020).

Uma ótima técnica para melhorar a drenagem do solo é o cultivo em sistemas de aléias, sistema em que culturas agrícolas são cultivadas entre fileiras de leguminosas. Esse sistema aumenta a taxa de infiltração e retenção de água, sendo que a capacidade de drenagem do solo é de grande importância nos trópicos úmidos, pois são solos suscetíveis ao encrostamento devido à alta quantidade de chuvas (MOURA *et al.*, 2012). Esse sistema é também uma ótima alternativa quando se procura diminuir gastos com adubações químicas ou de fontes orgânicas, usando-se essas, apenas, como complemento à biomassa das leguminosas desse sistema

(MATTAR *et al.*, 2013). O desenvolvimento das culturas associadas é favorecido pelo fornecimento de nutrientes liberados pela decomposição de resíduos das leguminosas, preferencialmente as de crescimento rápido e que tenham associação simbiótica com bactérias fixadoras de N₂. Os resíduos são aplicados por meio de podas regulares e ao longo do tempo, sucessivas podas aumentam, também, os teores de matéria orgânica (MO) no solo e promovem uma melhor estabilidade de agregados (KANG *et al.*, 1984).

A estabilidade do carbono em sistemas de aléias tem forte ligação com o tipo de leguminosas utilizadas, segundo Haynes (1986), resíduos com elevada relação C/N (> 25) e altos teores de lignina e polifenóis sofrem uma decomposição mais lenta e levam a formação de uma cobertura morta estável que influencia de forma positiva as características físicas do solo (como a infiltração de água, estrutura, porosidade, etc.). Já resíduos com baixa relação C/N e teores de lignina e polifenóis reduzidos apresentam uma decomposição rápida e fornecem para o solo grandes quantidades de nutrientes.

Diversos autores, como Cornejo e Hermosín (1996) e Ellerbroock & Gerke (2018, 2021) se propuseram a explicar o mecanismo de interação entre as frações minerais e orgânicas do solo, como a adsorção de moléculas orgânicas aos minerais de carga permanente por meio de pontes de cátions polivalentes, que ligam as superfícies minerais de carga negativa aos ânions orgânicos, essa interação resulta em alterações conformacionais na MO, que passam a ficar protegida de ataques microbianos.

Práticas que promovam formas sustentáveis para estocar carbono no solo precisam ser divulgadas, pois podem contribuir para a mitigação das mudanças climáticas (MENDES *et al.*, 2021). Apesar de o conhecido efeito na proteção física e na nutrição do solo, há uma escassez de estudos sobre a estabilização da matéria orgânica do solo, atividade microbiana e teores de cálcio influenciados pelos resíduos de leguminosas do sistema de aléias modificado, sobretudo para os solos da região do trópico úmido maranhense. Logo, este trabalho teve como objetivo verificar estabilidade do carbono e teores de cálcio em solos que receberam resíduos de leguminosas de diferentes qualidades, em um experimento em sistema de aléias conduzido em São Luís - MA.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o efeito da aplicação de biomassas de diferentes qualidades na estabilização e estoque de carbono em um argissolo distrocoeso enriquecido com cálcio, assim como o efeito dos resíduos sobre a compactação do solo e produtividade do milho.

2.2 Específicos

- Analisar a influência dos resíduos de leguminosas de diferentes qualidades e uma forrageira sobre a atividade microbiana do solo, assim como os teores de carbono orgânico total, particulado e associado ao mineral;
- Verificar a influência da combinação de resíduos de leguminosas de diferentes qualidades sobre os teores de cálcio, magnésio e potássio.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 - Indicadores Biológicos da qualidade do solo

A qualidade do solo é avaliada através do uso de indicadores, atributos que refletem a condição de sustentabilidade do ecossistema, e esses indicadores podem ser classificados como físicos, químicos ou biológicos. Os microrganismos se enquadram como sensíveis bioindicadores da qualidade do solo, pois respondem rapidamente a mudanças no manejo do solo e alterações que afetem a MO, além disso, desempenham papel essencial para a prestação de serviços ecossistêmicos, como decomposição da MO, ciclagem de nutrientes, proteção das plantas ao ataque de patógenos e degradação de substâncias tóxicas (MANN *et al.*, 2019; LEE *et al.*, 2020). Segundo Araújo e Monteiro (2007) e Wang *et al.* (2003), as alterações da população e atividade microbiana podem refletir sinais de melhoria ou degradação do solo de forma mais rápida que indicadores físicos ou químicos. As análises de carbono da biomassa microbiana e a relação da respiração basal por unidade de biomassa microbiana são indicadores avaliados para a determinação dessa qualidade, além disso, a atividade microbiana pode ser mensurada por meio do quociente microbiano.

No sistema de aléias, a microbiota é estimulada a degradar a MOS devido ao maior contato com resíduos vegetais, a atividade de oxidação biológica da MO a CO_2 é medida pela respiração basal do solo, técnica mais frequente para quantificar a atividade microbiana (BABUR, 2019). Além da correlação com o conteúdo de MO, a respiração microbiana é influenciada também pela disponibilidade de nutrientes, estrutura do solo, temperatura, umidade, dentre outros (LULL *et al.*, 2020). Segundo Islam e Weil (2000), altas taxas de respiração permitem indicar ou não distúrbios no solo, devido a isso, essa análise não deve ser feita isoladamente e, sim em conjunto, por meio do quociente metabólico ($q\text{CO}_2$), definido como a razão entre a respiração basal do solo e o carbono da biomassa microbiana do solo, por unidade de tempo. Biomassas que incorporam mais C aos tecidos microbianos e apresentam menor perda de C na forma de CO_2 são consideradas aquelas mais eficientes. Para Wardle e Ghani (1995), altos valores de $q\text{CO}_2$ podem ser considerados um indicativo de estágio inicial de desenvolvimento de comunidades microbianas, tais valores podem ocorrer devido a algum stress metabólico na população microbiana ou por uma maior proporção de microrganismos ativos em relação aos inativos. Apesar de ser sensível às práticas de manejo, a grande variabilidade dos resultados torna essa análise do solo limitada e de difícil interpretação quando realizada de forma isolada, dessa forma, a análise do quociente microbiano e atividade da desidrogenase(enzimas) fornecem informações que permitem um entendimento adequado da atividade microbiológica no solo.

As enzimas do solo são responsáveis pelo funcionamento e manutenção dos seres vivos, pois participam nas reações metabólicas intercelulares. As enzimas podem ser encontradas dentro das células dos microrganismos ou por meio de excreções realizadas por eles, atuam como catalisadoras de diversas reações, que resultam na decomposição de substratos orgânicos (glucosidases, desidrogenases, celulasas, ligninases, proteases e galactosidades), estruturação e formação da MO e ciclagem de nutrientes (urease, sulfatase, amidases e fosfatases) (NANNIPIERI e CECCANTI, 2017; DICK, 2020).

3.2 - Importância da Matéria Orgânica no Solo

A matéria orgânica do solo (MOS) pode ser definida como uma mistura complexa de componentes vegetais reconhecíveis, em grande parte inalterados, acrescidos de um grupo de materiais altamente modificados que não apresentam nenhuma semelhança morfológica com os componentes originais. A formação da MOS é resultado de processos de transformação e

decomposição conhecidos como “humificação”, o principal produto desse processo é uma família de compostos intimamente relacionados, as substâncias húmicas (HAYES e SWIFT, 2020).

Os atributos do solo influenciados pela MOS que mais se destacam são a estrutura, o suprimento de nutrientes, a capacidade de troca iônica e o tamponamento do pH. Ademais, a MOS pode atuar como fonte de energia para os microrganismos, possui potencial de reduzir a contaminação das águas superficiais e subterrâneas pela adsorção de poluentes, há também efeitos na disponibilidade de ar e água às raízes das plantas e no desenvolvimento do sistema radicular (MARTINS *et al.*, 2009).

Além de atuar como reservatório de carbono, a MOS possui grande importância na manutenção da produtividade dos agroecossistemas com base no papel central que o carbono desempenha na qualidade e funcionamento do solo, a retenção de C nas camadas do solo ajuda a reduzir os elevados níveis de CO₂ atmosféricos, assunto de importância global no enfrentamento ao aquecimento global, possuindo similar importância na redução das emissões de CO₂ pela queima de combustíveis fósseis (HOEGH-GULDBERG, 2018; GERKE, 2021).

Para Cotrufo *et al.* (2013, 2019), o estoque de carbono no solo pode ser entendido de forma mais clara quando as frações da matéria orgânica são analisadas separadamente, o carbono orgânico particulado (COP) e o carbono orgânico associado aos minerais (COAM) apresentam características distintas quanto a persistência no solo, o COP é formado predominantemente de material vegetal, possui vários compostos orgânicos com baixa presença de N que persistem no solo devido a proteção física fornecidos pela argila e silte ou a formação de complexos secundários, associados principalmente ao cálcio. O COAM é feito, principalmente, a partir de resíduos microbianos ricos em N e que persistem no solo devido a associações com minerais ou proteção física em pequenos agregados. O COP é mais suscetível a distúrbios ambientais e seu ciclo no solo é mais rápido quando comparado ao COAM, que é uma fração com maior grau de estabilização.

Manter a MO no solo é de enorme importância para o município de São Luís, considerando a taxa de decomposição e queima da matéria orgânica no solo devido à alta pluviosidade média e insolação equatorial que afetam a região, uma das principais soluções é neutralizar a acidez tóxica e manter a estrutura do solo, por onde o fluxo de água deve fluir. Uma alternativa capaz de solucionar grande parte desses problemas é o fornecimento de cátions ao solo somado ao uso contínuo de cobertura morta (MOURA, 2004; FEITOSA *et al.*, 2021).

3.3 – Eficiência do uso de Carbono

A eficiência do uso de carbono (CUE) é definida como a razão entre a produtividade primária líquida e a produtividade primária bruta, esse parâmetro fisiológico é relacionado a proporção de C adquirido do ambiente que é usado para a construção do tecido vegetal. A produtividade primária líquida é representada pelo crescimento vegetal, estimado diretamente por meio do incremento de C na biomassa vegetal e na serrapilheira, enquanto produtividade primária bruta é usada para estimar a quantidade de C imobilizado (CROWTHER; BRADFORD, 2013; DALMONECH *et al.*, 2022; MATHIAS e THUGMAN, 2022). Por meio desse parâmetro fisiológico, é possível quantificar o ciclo do carbono no ecossistema, por exemplo, um valor de 0,7 indica que 70% do carbono adquirido é destinado a biomassa. Os valores de CUE são sensíveis às condições e mudanças ambientais, por exemplo, altas temperaturas reduzem o CUE e alta disponibilidade de N aumentam a eficiência (ZHA *et al.*, 2013; HORN *et al.*, 2021).

O equilíbrio entre as taxas de mineralização e imobilização depende bastante da quantidade de carbono no resíduo e da relação entre carbono e nitrogênio, carbono e fósforo ou carbono e enxofre, entre essas, a mais utilizada é a relação C/N. Quando o resíduo é adicionado ao solo, o aumento da população microbiana é estimulado pelo aporte de energia e nutrientes que o resíduo apresenta. À medida que ocorre um aumento na população microbiana, há um aumento na demanda por oxigênio, nutrientes, energia e carbono (SANTOS; CAMARGO, 1999; ROWLEY *et al.*, 2018).

Considerando que o teor de carbono típico da matéria seca de plantas é cerca de 42% e o conteúdo de nitrogênio de resíduos de plantas é bem menor e muito variável, cerca de 6%, a relação C/N nos resíduos vegetais varia entre 10:1 e 30:1 em folhas verdes jovens de leguminosas, e 600: 1 para alguns tipos de serragem. Geralmente, a proporção de proteínas presente nos tecidos das plantas diminui à medida que as plantas amadurecem, enquanto a relação C/N na porção celulose e lignina aumentam. Tais diferenças influem diretamente na taxa de decomposição quando resíduos de plantas são adicionados ao solo (BRADY e WEIL, 2013; LI *et al.*, 2019).

Para Espíndola (2001), o aporte da biomassa e a decomposição dos resíduos das leguminosas podem ser uma fonte de carbono e nutrientes para a biota do solo e posteriormente para as plantas, dando especial destaque a importância da sincronização entre a liberação de

nutrientes pelas plantas em consórcio e sua demanda pelas culturas principais. Os microrganismos heterotróficos são os principais responsáveis pela decomposição de resíduos orgânicos sobre o solo, que retiram elementos essenciais para a sua nutrição, a fração de carbono é utilizada por eles para produção de energia e construção de seus tecidos (AITA, 1997; OLIVER *et al.*, 2021). A concentração de N em tecidos microbianos é em média 5%, resultando em uma relação C/N entre 20 e 30, significa que os resíduos que possuem uma relação C/N entre 20 e 30 fornecerão o nitrogênio necessário para reprodução microbiana, não havendo imobilização e nem mineralização significativa no início do processo. Se, caso a relação C/N for maior, os microrganismos buscarão outras fontes de N para satisfazer a demanda, consumindo formas de nitrogênio que estão disponíveis para as plantas, resultando em uma imobilização líquida e que pode causar uma deficiência temporária de nitrogênio para as plantas. Se a relação C/N for menor, haverá um excesso de N no resíduo, que será mineralizado pelos microrganismos, permanecendo disponíveis para as plantas já no primeiro momento (SANTOS e CAMARGO, 1999). Além dos fatores bióticos (ex.: relação C/N do resíduo e composição bioquímica), os fatores abióticos (Ex.: umidade do solo e do resíduo, textura do solo, luz, temperatura e índices pluviométricos) também influenciam a velocidade do processo de decomposição e definem a persistência desses resíduos na superfície do solo (ESPÍNDOLA *et al.*, 2006; TORRES *et al.*, 2008).

Algumas leguminosas, por possuírem alta relação C/N, são mais indicadas para cobertura e proteção do solo por possuírem taxas de decomposição mais lentas devido aos elevados teores de lignina, o Sombreiro (*Clitoria fairchildiana*) e a Acácia (*Acacia mangium*) podem ser usados como exemplo. Essas leguminosas arbóreas possuem uma relação C/N de 23 e 27, respectivamente, apesar do benefício como cobertura vegetal, a Acácia possui menores teores de N, P, K e Mg quando comparada a Gliricídia (*Gliricidia sepium*) e Leucena (*Leucaena leucocephala*). Em relação ao Ca e P, Aguiar *et al.* (2010) observaram altas concentrações de Ca (13,82 e 17,84 g kg⁻¹) e baixas concentrações de P (0,51 e 2,83 g kg⁻¹) nos tecidos de Leucena e Gliricídia, respectivamente. Todas as quatro espécies estudadas exibiram valores semelhantes quando cultivadas em sistema de cultivo em aléias modificado.

O conhecimento da taxa de decomposição do material vegetal e liberação de nutrientes de resíduos culturais das plantas de cobertura é uma importante informação para tomada de decisão sobre quais espécies serão utilizadas para a disponibilização de MO. Essa estratégia de manejo é essencial para maximizar a ciclagem e o aproveitamento de nutrientes pelas culturas comerciais, assim como para a cobertura do solo (AITA e GIACOMINI, 2006).

Um correto manejo com a intenção de preservar e aumentar o estoque de C no solo pode afetar as propriedades químicas e físicas do solo, influenciando na disponibilidade de N para a biomassa microbiana e para as plantas, que por sua vez, podem reduzir a perda de carbono (fluxos de CO₂) do solo (CAMPOS *et al.*, 2020).

3.4 – Interação entre cátions polivalentes e matéria orgânica para a estabilização do COS

Cátions polivalentes, como Ca²⁺, são capazes de interagir com a MO em solos, formando pontes entre diferentes moléculas de matéria orgânica, assim como pontes entre MO e superfícies minerais. Cátions que se associam com MO representam os cátions que interagem exclusivamente com a MO, associações MO-cátion-mineral representam cátions que formam pontes entre MO e minerais. Para interagir com cátions, a matéria orgânica do solo utiliza principalmente grupos funcionais que possuem ligações duplas entre átomos de C e O, como ésteres, ânions carboxilato, amidas (proteínas), cetonas, aldeídos e ácidos carboxílicos. Esses grupos funcionais são totalmente carregados negativamente, como ânion carboxilato, ou são parcialmente carregados negativamente (Ex.: ésteres, amidas, aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos, etc.) e devido a isso contribuem para a troca de cátions (ELLERBROOCK e GERKE, 2018, 2021).

De forma geral, os mecanismos de ligação das partículas do solo diferem dependendo da natureza do sorbato e do sorvente. Um dos principais fatores que afetam as reações de sorção é a composição da solução do solo. Por exemplo, o pH afeta a carga de superfície dos minerais de carga variável e a dissociação dos grupos funcionais da MO, podendo determinar o mecanismo de interação. A adição de cátions aumenta a sorção de compostos orgânicos sobre os argilominerais (PILLON *et al.*, 2002).

A maior parte da matéria orgânica do solo encontra-se associada com a fração mineral por meio dos complexos argila-MO. Para Edwards e Bremner (1967), íons polivalentes (Ca²⁺, Fe²⁺, Fe³⁺ ou Al³⁺) podem ligar as partículas de argila à MO, resultando na formação de um complexo argila-cátion-MO. Entretanto, Mortland (1970) incluiu ao modelo de Edwards e Bremner (1967) uma ponte de água entre o cátion polivalente e a MO, pois o mecanismo de ligação mais importante nesse modelo poderia facilmente ser quebrado por vibração, poderia ser argila-cátion polivalente-H₂O-MO. Segundo esse autor, a coordenação direta entre grupos

funcionais e cátions polivalentes poderia ser muito forte e por consequência menos suscetível ao rompimento pela vibração promovida pelo ultrassom.

A proposição destes mecanismos de ligação entre as superfícies minerais e a MO deu origem ao modelo de formação de microagregados em solos. Edwards & Bremner (1967) sugerem que a estrutura básica em solos são os microagregados, que consiste de partículas de argila (C)-cátions polivalentes (P)-matéria orgânica (OM). Os complexos de C-P-OM e $(C-P-OM)_x$, com diâmetro menor que 2 μm , formam os microagregados com diâmetro $< 250 \mu\text{m}$ $((C-P-OM)_x)_y$, no qual x e y são números finitos inteiros. A formação de ligações argila-cátion polivalente-argila (C-P-C) e MO-cátion polivalente-MO (OM-P-OM) também são sugeridas por esses autores, e, segundo eles, essas partículas podem contribuir para a agregação em muitos solos.

Cátions desempenham importante papel na estabilização e acúmulo de COS no solo, porém, vários outros fatores devem ser levados em consideração, como a quantidade de C aplicado, condições físicas e químicas do solo, umidade, temperatura, perdas causadas pela respiração microbiana e manejo do solo, que afetam a perda de C através da mineralização (ZHOU *et al.*, 2017 LORENZ e LAL, 2009).

3.5 Sistema de Cultivo em Aléias Modificado

O cultivo em aléias é um tipo de sistema agroflorestral caracterizado pelo plantio intercalado de espécies alimentares com espécies arbóreas ou arbustivas, de preferência leguminosas, pelo fato destas estarem associadas com bactérias fixadoras de nitrogênio. A poda e deposição de parte da biomassa dessas leguminosas fornece nutrientes às culturas associadas, possibilitando também o controle de ervas daninhas tanto pelo sombreamento quanto pela cobertura morta (GLIESSMAN, 2005).

Tradicionalmente empregada em regiões tropicais da África e Ásia, a adoção desse sistema permite melhoras nas dimensões físicas, químicas e biológicas da qualidade dos solos, principalmente na camada superficial. São observados incrementos significativos de pH e de cátions trocáveis, que refletem positivamente na CTC, índice de saturação por bases, aumento no teor de carbono orgânico, estabilização da MO, elevação dos teores de potássio (K^+), magnésio (Mg^{++}), fósforo (P), cálcio (Ca^{++}) e nitrogênio (N) (MAFRA *et al.*, 1998;

NASCIMENTO *et al.*, 2003). Para Mendonça & Stott (2003), o sucesso do cultivo do sistema em aléias está relacionado à quantidade e qualidade da biomassa podada das árvores, quantidade de nutrientes liberados do material vegetal durante o processo de decomposição e tempo de liberação de nutrientes para satisfazer as necessidades das culturas subsequentes ou em consórcio.

Moura *et al.* (2015) estudaram os efeitos da aplicação da poda da biomassa leguminosas de diferentes relações C/N (*Gliricidia Sepium*, *Leucaena leucocephala*, *Acacia Mangium* e *Clitoria fairchildiana*) sobre as funções ecossistêmicas em um sistema de plantio direto, os autores observaram aumentos significativos na abundância de grupos funcionais do solo, predadores e transformadores de liteira. Somado com a cobertura do solo, a liteira transformada influenciou, positivamente, vários atributos do solo, como a diminuição da densidade, aumento da porosidade do solo, melhoria na infiltração de água, aumento nos teores de carbono orgânico total e fração leve livre da matéria orgânica do solo.

Com base nessas observações, foi possível demonstrar a viabilidade do uso de leguminosas arbóreas, a exemplo das que foram estudadas por Ferraz (2004) e Moura *et al.* (2021) (*Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium*, *Acacia mangium* e *Clitoria fairchildiana*) na melhoria nas dimensões da qualidade dos solos (físicas, químicas e biológicas).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido no ano de 2021, na Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, Maranhão, Brasil (2°30'S, 44°18'W). O clima da região é definido como Aw, caracterizado como tropical subúmido seco, segundo a classificação de Köppen (KOTTEK, *et al.*, 2006), com dois períodos bem definidos, um chuvoso (convencionalmente chamado de inverno), que vai de janeiro a junho, e outro seco (convencionalmente chamado de verão), nos meses de julho a dezembro. A temperatura média durante o período experimental foi 27,35 °C, a temperatura máxima foi 33,9 °C e a mínima foi 21,1 °C. A precipitação pluviométrica acumulada em 2021 foi de 2.515 mm (INMET, 2022). O solo da área experimental foi classificado como argissolo, 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. A calagem inicial na área começou em janeiro de 2002, com

aplicação em superfície de 1 ton./ha de cal hidratada, correspondendo a 279 e 78 kg ha⁻¹ de Ca e Mg, respectivamente.

O experimento foi realizado em um sistema de aléias modificado (as leguminosas de sistemas modificados são podadas antes do plantio das culturas que serão consorciadas), a área experimental contava com leguminosas já estabelecidas, o tamanho das parcelas foi de 10 x 4 m, com as leguminosas espaçadas 4 m entre linhas simples e 0,5 m entre linhas duplas. As leguminosas avaliadas 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 com alta qualidade de resíduos e baixa relação C/N. Além das leguminosas, foram aplicados ao solo resíduos de capim Mombaça, que havia sido plantado na área em experimentos anteriores.

A área útil para determinação da produtividade da parcela foi determinada excluindo-se 1 metro das extremidades das fileiras. Antes da semeadura foram aplicados 80,0 kg ha⁻¹ da formulação 8-20-20, o milho (*Zea Mays L.*) cultivar híbrido AG-7880 foi plantado após a adubação, em 2021, entre as fileiras de leguminosas. Após o plantio do milho, as leguminosas presentes em cada tratamento foram podadas, pesadas e os resíduos (galhos finos e folhas) foram aplicados no solo (Figura 1) em toda a área das parcelas. Os resíduos de capim Mombaça foram cortados a 5 cm do solo, a aplicação dos resíduos foi organizada na seguinte ordem: Sombreiro + Leucena (S+L); Acácia + Leucena (A+L); Gliricídia + Leucena (G+L); Acácia + Gliricídia (L+G); Sombreiro + Gliricídia (S+L); Mombaça (M) e Controle, sem cobertura.

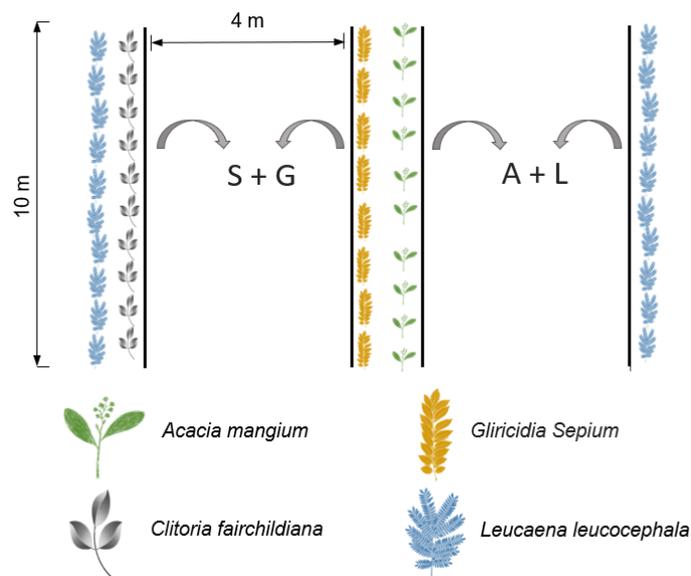


Figura 1. Diagrama de tratamentos da área experimental. S+G = Sombreiro + Gliricídia; A+L = Acácia + Leucena

A quantidade de resíduos aplicados em cada tratamento variou considerando-se o teor de N presente na biomassa de cada leguminosa e as curvas de liberação de nutrientes apresentadas por Aguiar *et al.* (2010), Moura *et al.* (2010), Aguiar *et al.* (2018) e Da Costa Leite *et al.* (2019) (Tabela 1). O delineamento utilizado foi o de blocos ao acaso, com sete tratamentos e quatro repetições.

Tabela 1. Quantidade da matéria seca da combinação de leguminosas e de Mombaça aplicada no solo em 2021.

	S+L	A+L	L+G	A+G	S+G	M
Matéria seca (Mg ha⁻¹)	12	12	9	14	13	2

S+L= Sombreiro + Leucena; A+L= Acácia + Leucena; L+G= Leucena + Gliricídia; A+G= Acácia + Gliricídia; S+G= Sombreiro + Gliricídia; M: Mombaça.

4.2 Indicadores Biológicos da Qualidade do Solo

As amostras de solo para análises das propriedades biológicas do solo foram coletadas em maio de 2021, foram analisados 3 diferentes indicadores da qualidade do solo, o quociente microbiano (qMic), o quociente metabólico (qCO₂) e o índice do potencial metabólico (desidrogenase/CSA). O quociente microbiano foi calculado de acordo com a relação entre o carbono da biomassa microbiana (CBM) e o carbono orgânico total. A determinação do CBM

foi realizada de acordo com a metodologia de Yeomans e Bremner (1998), na qual as amostras foram irradiadas em micro-ondas, transferidas para erlenmeyers e em seguida para agitador horizontal. Após a agitação e filtração do sobrenadante, foram adicionados às amostras 10 ml de ácido sulfúrico concentrado, 2 ml de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) a $0,066 \text{ mol L}^{-1}$ e 50 ml de água destilada, as soluções foram tituladas com sulfato ferroso amoniacal. O cálculo dos valores da CBM foi obtido de acordo com a diferença entre as amostras irradiadas e não irradiadas. A cálculo do q_{Mic} é exibido na equação 1:

$$q_{Mic} (\%) = \frac{CBM}{COT}$$

Equação 1 – Determinação do quociente microbiano, onde q_{Mic} = quociente microbiano; CBM: carbono da biomassa microbiana ($\mu\text{g C g}^{-1}$); COT: carbono orgânico total (mg C g^{-1}). Os valores para esse quociente são exibidos em porcentagem.

O quociente metabólico representa a quantidade de CO_2 liberado por unidade de biomassa microbiana em um determinado intervalo de tempo, o cálculo da q_{CO_2} foi determinado a partir da respiração basal do solo pelo carbono da biomassa microbiana. A taxa de respiração basal do solo mede a produção de CO_2 resultante da atividade metabólica de microrganismos, macroorganismos e raízes vivas, sua medição pode ser considerada uma estimativa indireta da velocidade de decomposição da MOS (KUMMER *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2010). O quociente metabólico é determinado pelo método proposto por Anderson e Domsh (1993). As amostras de solo coletadas foram incubadas junto com 10 ml da solução de NaOH ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$) em recipiente fechado. Após sete dias de incubação, os recipientes foram abertos para permitir a troca de ar entre as amostras e o ambiente e foram adicionados 2 ml de cloreto de bário ($0,05 \text{ mol L}^{-1}$). As soluções então foram tituladas em HCL ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$) após adição de fenolftaleína como indicador. Para controle, foram usados frascos sem solo. O quociente metabólico foi determinado a partir da razão entre a respiração basal do solo e o carbono da biomassa microbiana, conforme a equação 2:

$$q_{CO_2} = \frac{RBS(\text{mgC-CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ solo} \cdot \text{h}^{-1})}{CBM (\text{mgC} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ solo}) \cdot 10^{-1}}$$

Equação 2 – Determinação do quociente metabólico do solo, onde q_{CO_2} = quociente metabólico do solo; RBS: respiração basal do solo; CBM: carbono da biomassa microbiana do solo.

A atividade da desidrogenase no solo foi determinada segundo Casida *et al.* (1964), pela leitura em espectrofotômetro da quantidade de trifeniltetrazólio formazan (TTF) obtido após a incubação em banho maria a 37°C por 24 horas da solução de trifeniltetrazólio (TTC). O método baseia-se no fato da maioria dos micro-organismos reduzirem TTC a TTF através da enzima desidrogenase. O carbono solúvel em água foi determinado pela oxidação por dicromato (YEOMANS e BREMNER, 1988). Com base nos resultados dessas análises foi possível calcular o índice do potencial metabólico, definido como a relação entre a atividade desidrogenase e o carbono solúvel em água (DH-ase/CSA). Esse índice representa a atividade metabólica do solo (MASCIANDARO *et al.*, 1998, 2000).

4.3 Análise Química e da Matéria Orgânica do Solo

O solo da área experimental foi coletado em maio de 2021, com o auxílio de trado, quando coletou-se três amostras simples por tratamento para gerar uma amostra composta, na camada 0-20 cm de profundidade, totalizando 28 amostras. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras com malha de 2 mm. Para a determinação dos teores de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis foi utilizado extrator de cloreto de amônio (CANTARELLA *et al.*, 2001), realizada com o auxílio do aparelho de espectroscopia atômica Varian 720-ES ICP.

Para a determinar o conteúdo da matéria orgânica, foi utilizada a metodologia de Cambardella e Elliott (1992). As amostras de solo foram secas ao ar, peneiradas em malha de 2 mm, pesadas e maceradas com um almofariz de porcelana para que as partículas fossem desagregadas, após esse processo foi adicionado às amostras 80 ml da solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}). As misturas foram agitadas por 15 horas em agitador horizontal a 130 RPM. Após esse processo, o conteúdo de cada amostras foi colocado em peneira de 0.052 mm e lavados com jatos leves de água destilada até que a argila de cada amostra fosse completamente removida, o material retido na peneira, definido como o matéria orgânica particulada, foi seco a 50°C e em seguida o material foi macerado novamente, uma pequena quantidade foi coletada, pesada e o conteúdo de C foi analisado, representando o carbono orgânico particulado do solo (COP). Já o carbono orgânico total (COT) foi obtido seguindo o método de oxidação via úmida, de acordo com Yeomans e Bremner (1988). O carbono orgânico associado ao mineral (COAM) foi calculado de acordo com a diferença entre os valores de COT e COP. A matéria orgânica do solo (MOS) foi calculada ao multiplicar o

COT pelo fator 1,724 de Van Bemmelen, que assume que a MOS contém 58% de C (ALLISON, 1965). O estoque de carbono no solo foi calculado de acordo com a equação abaixo (VELDKAMP, 1994):

$$\text{ECS} = (\text{COT} \times \text{Ds} \times e) / 10 \quad (2)$$

onde:

ECS: estoque de C orgânico em determinada profundidade (Mg ha^{-1});

COT = carbono orgânico total na profundidade amostrada (g Kg^{-1});

Ds = densidade do solo na camada amostrada (Kg dm^{-3});

e = espessura da camada amostrada (cm).

4.4 Propriedades Físicas do Solo

A resistência a penetração do solo (RP) foi avaliada na camada de 0-20 cm, com 5 repetições por tratamento, em junho de 2022, após 6 dias sem chuva. A RP foi medida com auxílio de um penetrômetro digital (Falker, Porto Alegre, Brasil) com graduações de 1 cm. As barras de nível crítico, definidas por Hazelton e Murphy (2007), foram usadas para construir o gráfico de resistência do solo à penetração. As médias usadas na construção do gráfico (2,5 cm, 7,5 cm, 12,5 cm e 17,5 cm) foram obtidas por meio da interpolação da profundidade inicial e final dos valores escolhidos.

4.5 Determinação dos Componentes de Produtividade

Após a poda e aplicação dos ramos das leguminosas e biomassa do capim Mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça), foi realizada em 22/01/2021, no início do período chuvoso, a semeadura do milho (*Zea Mays L.*) cultivar híbrido AG-7880, entre as linhas das leguminosas. O plantio dessa cultura serviu como indicador da qualidade da combinação das leguminosas, e o espaçamento utilizado foi de 90 cm entre linhas e 20 cm entre plantas nas fileiras, com um total de 4 fileiras por tratamento. Para a semeadura foi aplicado 80 kg ha^{-1} da formulação 8-20-20. A adubação de cobertura foi parcelada em duas vezes, realizadas quando as plantas de milho alcançaram 4 e 8 folhas, com aplicação de 27 kg ha^{-1} de N na forma de ureia em cada adubação. A espigas de milho foram colhidas em 24/05/2021, quando as plantas alcançaram maturidade

fisiológica, os grãos foram secos ao sol e em estufa de secagem para alcançarem umidade de 13%. Os componentes de rendimento avaliados foram: quantidades de grãos em 1 m de fileira (grãos/metro), massa de 100 grãos e produtividade.

4.6 Análises Estatísticas

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância. Posteriormente, foi aplicado o teste de Tukey para a comparar o efeito dos tratamentos sobre as variáveis dependentes, a 5% de probabilidade. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o programa estatístico R, versão 4.1.0 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2021).

5 RESULTADOS

5.1 Indicadores Biológicos da Qualidade do Solo

Os indicadores biológicos da qualidade do solo são apresentados na figura 2. O quociente microbiano (Figura 2a) foi significativo a 5% de probabilidade entre os diferentes tratamentos, o tratamento L+G apresentou maiores valores de atividade microbiana no solo (10,05%), 76% maior em relação ao tratamento com resíduos de Mombaça, tratamento que apresentou menor valor médio. Não houve diferença estatística entre os tratamentos S+L, M e controle.

Houve diferença nos valores médios quanto ao quociente metabólico entre os diferentes tipos de combinações de leguminosas. As maiores médias foram encontradas nos tratamentos S+L e S+G, seguidas por A+G e A+L, com valores de 14,0 mg g⁻¹ h⁻¹, 13,1 mg g⁻¹ h⁻¹, 12,4 mg g⁻¹ h⁻¹ e 12 mg g⁻¹ h⁻¹, respectivamente. O tratamento L+G foi estatisticamente igual ao tratamento com resíduos de Mombaça e ao controle (Figura 2b).

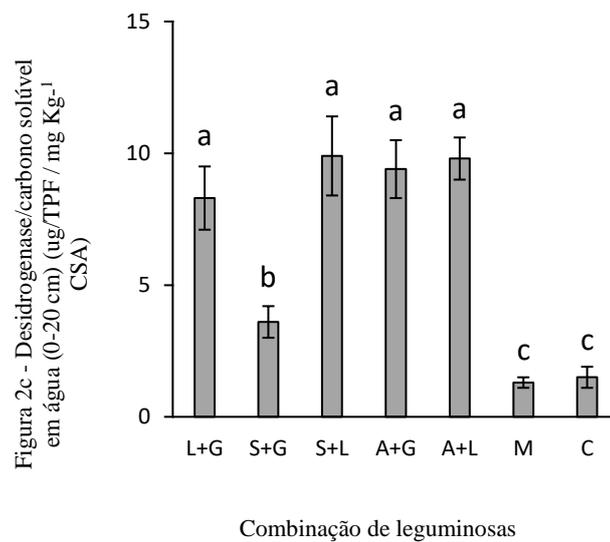
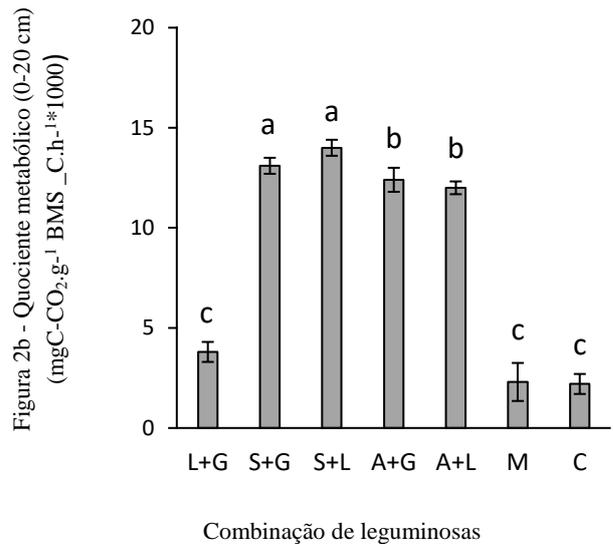
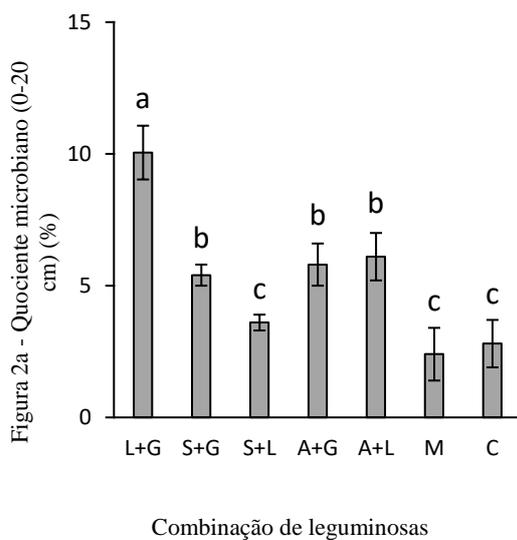


Figura 2. Indicadores biológicos da atividade do solo. a) Quociente microbiano; b) Quociente metabólico; c) Índice do potencial metabólico(DH-ase/CSA). S+L= Sombreiro + Leucena; A+L= Acácia + Leucena; L+G= Leucena + Gliricídia; A+G= Acácia + Gliricídia; S+G= Sombreiro + Gliricídia; M= Mombaça; C= Controle. Letras diferentes indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey ($P < 0,05\%$).

O índice do potencial metabólico, apresentado como a relação entre a desidrogenase e o carbono solúvel em água, é mostrado na figura 2c, os tratamentos L+G, S+L, A+G e A+L exibiram igualdade estatística e os maiores valores para a relação entre a enzima desidrogenase/carbono solúvel em água. O tratamento S+G apresentou valores médios inferiores em relação aos outros tratamentos com resíduos de leguminosas, porém foi superior ao controle e tratamento que recebeu resíduos de Mombaça, tratamentos que exibiram menores valores para essa variável.

5.2 Frações de Carbono Orgânico no Solo

Os tratamentos que receberam resíduos de leguminosas influenciaram, positivamente, as frações de carbono orgânico no solo (Tabela 2). Os resultados de COAM, COT, MOS e ECS foram maiores em todos os tratamentos que receberam resíduos de leguminosas em comparação ao controle, a 5% de probabilidade. O COP exibiu resultados superiores ao controle apenas nos tratamentos A+G, S+G, L+G, os tratamentos A+L e S+L, assim como o tratamento com resíduos de Mombaça, foram estatisticamente iguais ao controle.

Tabela 2. Valores médios das frações de carbono orgânico do solo (COS): carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM), carbono orgânico total (COT), matéria orgânica do solo (MOS) e estoque de carbono do solo (ECS) na profundidade 0-20 cm.

Tratamentos	Frações de carbono orgânico do solo (COS)				
	COP	COAM	COT	MOS	ECS
	----- (g kg ⁻¹) -----			g dm ⁻³	Mg ha ⁻¹
S+G	5,91 ab	9,45 a	15,37 a	26,75 a	19,98 a
A+G	5,95 a	9,34 a	15,10 a	26,28 a	19,63 a
L+G	4,74 ab	9,99 a	14,73 a	25,64 a	19,15 a
A+L	4,18 abc	7,10 b	12,48 b	21,71 b	16,22 b
S+L	4,43 abc	6,01 b	11,40 b	19,84 b	14,82 b
M	3,45 bc	2,99 c	5,24 c	9,12 c	6,81 c
C	2,90 c	2,36 c	4,96 c	8,64 c	6,45 c

S+L= Sombreiro + Leucena; A+L= Acácia + Leucena; L+G= Leucena + Gliricídia; A+G= Acácia + Gliricídia; S+G= Sombreiro + Gliricídia; M= Mombaça; C= Controle. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey (P < 0,05%)

Quando observado os resultados de carbono orgânico particulado, o tratamento A+G foi o único estatisticamente diferente em relação ao tratamento com resíduos de Mombaça (M). Os tratamentos S+G e A+G exibiram mais que o dobro do valor de COP em relação ao controle. Para os resultados de carbono orgânico associado ao mineral (COAM), observa-se uma superioridade dos tratamentos L+G, S+G e A+G em relação ao controle, às outras duas combinações de leguminosas e ao tratamento com aplicação de resíduos de Mombaça. Os resultados de COAM para L+G, S+G e A+G foram 323%, 300% e 295% maiores em relação ao controle, respectivamente. Em todos os tratamentos com leguminosas, é possível observar

que a fração que mais contribuiu para os resultados de COT foi o COAM, apenas para o controle e Mombaça houve maiores valores de COP em relação ao COAM.

Para os resultados de COT, MOS e ECS, os tratamentos S+G e A+G, junto com o tratamento Leucena + Gliricídia (L+G), foram os que mais se destacaram estatisticamente, exibindo médias estatísticas iguais entre si e superiores aos tratamentos A+L e S+L. O tratamento com resíduos de capim Mombaça apresentou menores resultados de COS em relação aos tratamentos com aplicação de resíduos de leguminosas.

5.3 Resistência do Solo à Penetração

A Figura 3 apresenta os dados da resistência do solo à penetração, todos os tratamentos com mulching de leguminosas e da gramínea diminuíram a resistência do solo à penetração e exibiram resistência moderada na profundidade 7,5 cm. Os tratamentos com menores valores de resistência para essa profundidade foram A+L e S+G, os únicos tratamentos estatisticamente diferentes do controle, que exibiu valor de 1,14 Mpa para a profundidade 7,5 cm, valor considerado alto. Na profundidade 17,5 cm todos os tratamentos exibiram resistência elevada, com variações entre 1,6 e 1,8 Mpa, nenhum dos tratamentos ultrapassaram resistências maiores que 2,0 Mpa, valor considerado muito alto.

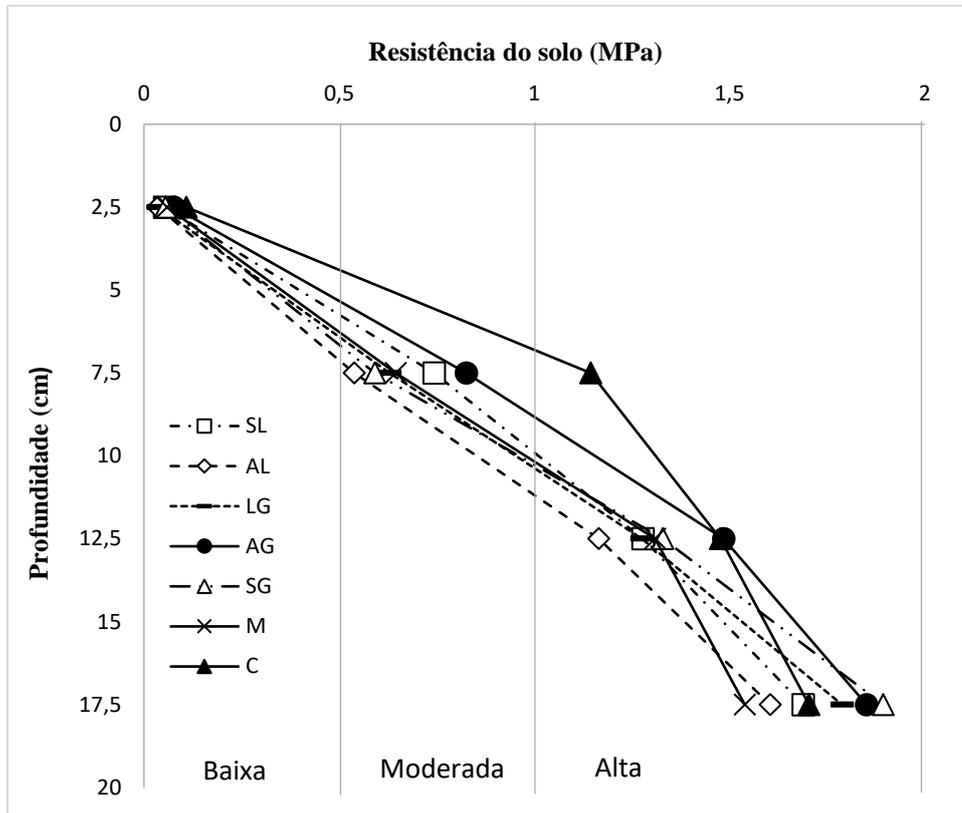


Figura 3. Resistência do solo à penetração (Mpa) após 6 dias sem chuva. S+L= Sombreiro + Leucena; A+L= Acácia + Leucena; L+G= Leucena + Gliricídia; A+G= Acácia + Gliricídia; S+G= Sombreiro + Gliricídia; M= Mombaça; C= Controle. Barras verticais mostram os níveis críticos, de acordo Hazelton & Murphy (2007).

5.4 Análise Química do Solo

O resultado do conteúdo de cálcio no solo é apresentado na tabela 3, não houve diferenças estatísticas nos teores de Ca entre os tratamentos com leguminosas, apenas em relação ao tratamento com resíduos de Mombaça e Controle. Houve uma grande diferença entre os tratamentos que receberam resíduos de leguminosas em relação ao controle e M (Mombaça), em comparação com o controle, o tratamento S+L apresentou teores de cálcio 50% maiores, mesmo o tratamento em aléias com menor teor de Ca (A+G) obteve uma quantidade 38% maior.

Tabela 3. Análise química do solo (mmolc/dm^3) e soma de bases nos diferentes tratamentos, na profundidade 0-20 cm.

Tratamentos	Conteúdo de cátions			
	Ca	Mg	K	SB
S+L	48,45 a	16,44 a	11,53 a	76,42 a
A+L	47,73 a	15,57 a	11,21 ab	74,53 a
L+G	47,85 a	16,27 a	10,17 bc	74,30 a
S+G	48,39 a	14,99 a	9,51 cd	72,89 b
A+G	44,52 a	14,48 a	9,05 d	68,07 ab
M	33,63 b	9,69 b	5,39 e	48,69 c
C	32,14 b	9,29 b	4,70 e	46,14 c

S+L= Sombreiro + Leucena; A+L= Acácia + Leucena; L+G= Leucena + Gliricídia; A+G= Acácia + Gliricídia; S+G= Sombreiro + Gliricídia. M= Mombaça; C = Controle. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey ($P < 0,05\%$)

O conteúdo de Mg exibiu resultados estatísticos semelhantes aos resultados de Ca, porém, com pouca variação nas quantidades de Mg entre os tratamentos com aléias. Não houve diferença estatística entre os tratamentos em aléias, diferindo apenas em relação ao controle e M (Mombaça). O conteúdo de K diferiu estatisticamente entre os tratamentos analisados, mesmo entre os tratamentos que receberam resíduos de leguminosas. Os tratamentos S+L e A+L exibiram concentrações mais de duas vezes maiores em relação ao controle.

O valor da soma de bases (SB) foi superior em todos os tratamentos que receberam resíduos de leguminosa, observa-se uma diferença significativa entre o tratamento S+L, A+L, L+G, S+G e A+G em relação ao controle, o tratamento S+L exibiu valor de SB 65,6% maior em relação ao controle. Os tratamentos que receberam resíduos de Mombaça foram estatisticamente inferiores aos tratamentos com leguminosas em todos os resultados de conteúdo de cátions e estatisticamente iguais em relação ao controle.

5.5 Componentes de Produtividade do Milho

As variáveis grãos por metro, massa de 100 grãos e produtividade do milho são exibidas da tabela 4. A maior parte dos componentes de produtividade exibiram diferenças estatísticas entre os cultivos realizados em aléias e o controle. O controle e tratamento com resíduos de

Mombaça foram os responsáveis pelas menores quantidades de grãos por metro nas fileiras de milho, as médias de Mombaça e L+G não exibiram diferenças significantes, assim como as médias dos tratamentos A+L e L+G. O tratamento S+G apresentou maior quantidade de grãos por metro (1361 grãos) e foi estatisticamente superior a todos os outros tratamentos

Tabela 4. Componentes de produtividade do milho

Tratamentos	Grãos m ⁻¹	Massa de 100 grãos (g)	Produtividade (Mg ha ⁻¹)
S+G	1361 a	33,47 a	6,3 a
A+G	1180 b	33,20 a	5,4 ab
S+L	1237 b	27,61 b	4,7 bc
L+G	1032 cd	31,04 ab	4,1 cd
A+L	1053 c	30,19 ab	4,0 cd
M	932 de	27,35 b	3,6 d
C	914 e	26,51 b	3,3 d

S+L= Sombreiro + Leucena; A+L= Acácia + Leucena; L+G= Leucena + Gliricídia; A+G= Acácia + Gliricídia; S+G= Sombreiro + Gliricídia; M= Mombaça; C= Controle. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey (P< 0,05%)

Os tratamentos S+G, A+G, L+G e A+L exibiram os maiores valores de massa de 100 grãos, esses tratamentos foram estatisticamente iguais. O tratamento S+L exibiu os menores valores em comparação aos outros tratamentos em aléias e foi estatisticamente igual ao controle e tratamento com resíduos de Mombaça.

Foi observado no controle, com solo descoberto, e nos tratamentos L+G, A+L e Mombaça, os menores valores de produtividades, esses tratamento que demonstraram menor influência sobre a produtividade de milho. Foi obtida no tratamento A+L foi uma produtividade total de 4,0 Mg ha⁻¹, valor 57% menor quando comparada com S+G, tratamento que foi estatisticamente igual a A+G e superior a S+L, L+G, A+L, M e controle. Em relação ao controle, a produtividade de S+G foi 91% maior, indicando que a produtividade do milho foi positivamente afetada pela cobertura do solo com as combinações S+G, A+G e S+L.

Os tratamentos S+G e A+G e S+L obtiveram médias de produtividade superiores ao controle e Mombaça, padrão semelhante observado em teores de COS, no qual a combinação desses resíduos mostraram superioridade em relação aos demais tratamentos para a maioria variáveis analisadas. A aplicação de resíduos de capim Mombaça não diferiu estatisticamente em relação ao controle nas variáveis estudadas, em todas as variáveis os valores foram estatisticamente iguais ao controle.

5.6 Análise dos Componentes Principais (ACP)

A figura 4 exibe graficamente os resultados da análise dos componentes principais (ACP) para as principais variáveis estudadas, o primeiro componente principal explica 65,48% da variabilidade ocorrida entre os tratamentos. Os componentes principais 1 e 2 explicam juntos 76,41% da variação entre os tratamentos. Os atributos SB, Ca, COT e K foram os que exibiram maior explicação no PC1, as variáveis que mais explicaram o PC2 foram RP, COP e produtividade, esta última variável apresentou forte correlação positiva com as variáveis COT, COP, qCO₂ e COAM. As variáveis que exibiram maior correlação com o Ca foram a SB, K, COT, Mg e CAM. Pode-se observar que o tratamento Mombaça e controle exibiram uma maior associação com a resistência à penetração em relação ao demais tratamentos analisados, essa mesma variável apresentou correlação negativa com o COAM, Mg, Ca, SB e qMic. Entre os tratamentos que receberam resíduos de leguminosas, AL e LG foram mais associados ao qMic e DH-ase/CSA, enquanto SG e AG mostraram forte correlação com COP e produtividade, o controle apresentou correlação negativa para produtividade, assim como o tratamento com resíduos de Mombaça.

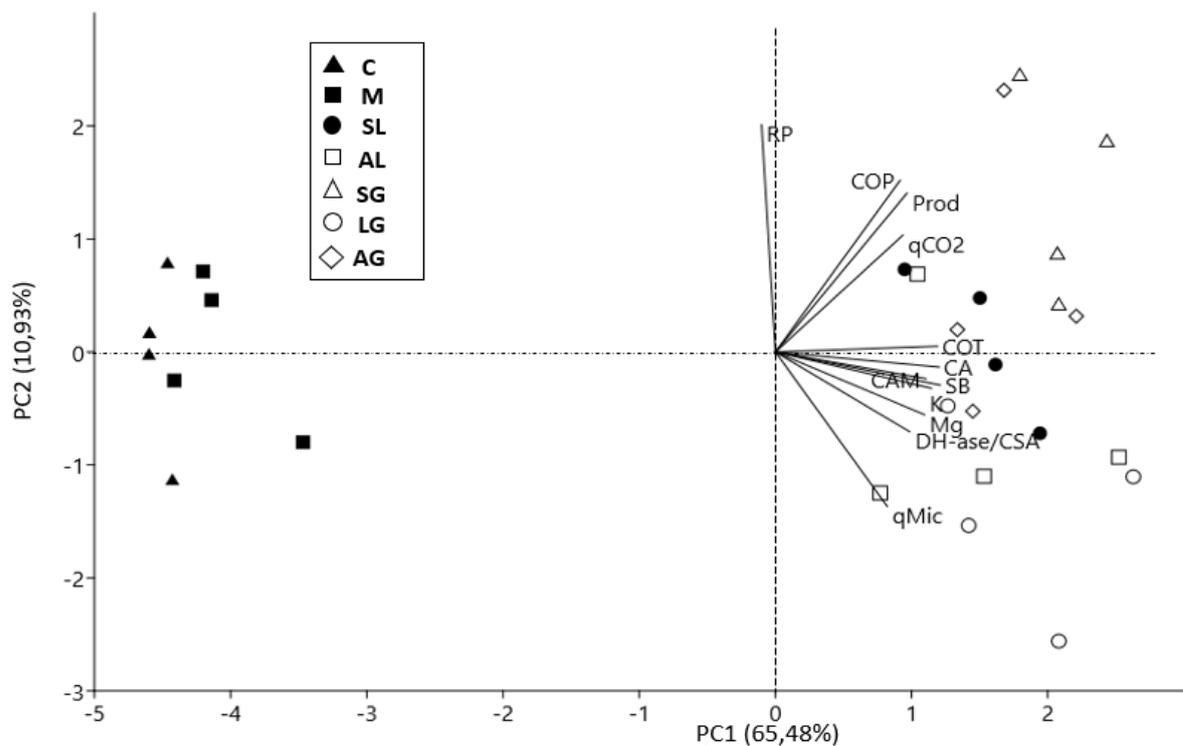


Figura 4. Análise dos componentes principais (ACP). RP= Resistência do solo à penetração (Mpa); COP= Carbono orgânico particulado (COP); COAM= Carbono orgânico associado aos minerais; COT= Carbono orgânico total; Produtividade; qCO₂= Quociente metabólico; qMic= Quociente microbiano; DH-ase/CSA= Índice do potencial metabólico; Mg= Magnésio; K= Potássio; Ca= Cálcio; SB= Soma de bases.

6 DISCUSSÃO

6.1 Indicadores Biológicos da Qualidade do Solo

Os maiores valores médios de qCO_2 (figura 2a) foram representados pelos tratamentos S+G, S+L, A+G e A+L, no $qMic$ (figura 2b) os maiores valores foram representados pelos tratamentos L+G, S+G, A+G e A+L, essa mesma superioridade em relação ao controle pode ser observada nos resultados de COP, presentes na tabela 2, evidência de que altas quantidades MO de boa qualidade são fontes de energia e nutrientes para os microrganismos heterotróficos e influenciam sua reprodução e atividade (POWLSON *et al.*, 1987; MOREIRA e SIQUEIRA, 2006). A qualidade do material aplicado pode justificar os altos valores das médias de $qMic$ para os tratamentos em aléias e menores médias para o controle (2,8%), com solo descoberto, e para o tratamento que recebeu resíduos de Mombaça (2,4%). Os altos valores de $qMic$ para o tratamento L+G (10,05%) indicam uma maior incorporação do COS na biomassa microbiana em relação aos demais. Segundo Silva *et al.* (2010), o $qMic$ indica a quantidade de COS que está imobilizada na biomassa microbiana. Altos valores de $qMic$ no solo podem estar relacionados ao qCO_2 apresentado da figura 2b. Entre os tratamentos em aléias, a combinação S+L foi a que apresentou menores valores de quociente microbiano. Segundo Cunha *et al.* (2011), quando a biomassa alcança maior eficiência no sistema, uma quantidade menor de CO_2 é perdido para a atmosfera e maior taxa de carbono é incorporada à biomassa microbiana, resultando em menores valores de qCO_2 . O tratamento Mombaça e o controle também exibiram menores valores de qCO_2 , contudo, isso não indica que a biomassa microbiana nesses tratamentos alcançaram maiores eficiências, pois os valores de $qMic$ para esses dois tratamentos também foram baixos, isso reforça a importância de analisar o $qMic$ e qCO_2 em conjunto. Segundo Alves *et al.* (2011), a análise isolada de uma dessas variáveis pode limitar a interpretação dos valores da atividade microbiana no solo.

A atividade da desidrogenase é um importante indicador da atividade microbiana no solo porque se refere a um grupo de enzimas (principalmente endocelulares) responsáveis pela catalização da oxidação da MOS. Altas atividades dessa enzima podem indicar, inicialmente, aumento da atividade microbiana no solo devido a altos teores de CSA, assim como o decréscimo nos teores dessa enzima no solo pode indicar menores teores de CSA. A figura 2c mostra que essa relação exibiu valores mais altos para os tratamentos que receberam resíduos de leguminosas, valores que podem ser explicados pela alta atividade microbiana devido a altas

quantidades de CSA, carbono que é facilmente biodegradado (BENITO *et al.*, 2003). As amostras foram analisadas poucos dias após a coleta, motivo que pode explicar os altos valores e diferença estatística em relação ao controle, alguns autores relatam a atividade dessa enzima, com o tempo, tende a se estabilizar e alcançar a fase de maturação, fase caracterizada pela redução da atividade microbiana, principalmente devido ao desaparecimento de compostos orgânicos facilmente degradáveis. Ao se comparar os resultados de COP com o índice do potencial metabólico, observa-se uma superioridade dos tratamentos S+G, A+G e L+G em relação ao controle e Mombaça, os valores desse índice para esses tratamentos foram maiores em relação ao controle pois essa fração lábil do COT estava acessível em maior quantidade para os microrganismos.

6.2 Frações de Carbono Orgânico no Solo

Os tratamentos com aplicação de resíduos de Gliricídia combinado com outras leguminosas foram os que mais contribuíram para o aumento nos estoques de C no solo (ECS). Ao considerar a baixa fertilidade natural dos solos do trópico húmido, a aplicação dos ramos podados dessa leguminosa desempenha um importante papel na reposição e aumento da matéria orgânica lábil no solo, representada pelos resultados de COP. Segundo Beedy *et al.* (2010) e Diouf *et al.* (2017), os resíduos de Gliricídia aplicados no solo levam a um aumento moderado nos teores de MO e aumentos substanciais no carbono lábil do solo, além de aumentar a capacidade de infiltração da água e redução da erosão do solo. Rahman *et al.* (2019) reportaram que essa leguminosa é capaz de se adaptar a diversos tipos de solo, desde solos ácidos ou alcalinos a solos arenosos ou argilosos com alto grau de compactação.

Os teores de COAM apresentados podem ser relacionados à estabilização da MO, segundo Rowley *et al.* (2018), parte da estabilização do carbono acontece devido a quantidade e qualidade da biomassa aplicada no solo, aplicação de N sintético e ao aumento dos teores de cálcio e magnésio. Os resíduos de alta qualidade (baixa relação C/N) são as mais eficientes para o aumento da biomassa microbiana, maior parte do COAM encontrado no solo é de origem microbiana, essa é a fração mais eficaz na estabilização da MOS (COTRUFO *et al.*, 2013, 2019). No presente trabalho, o COAM contribuiu mais para as quantidades de COT do que o COP, essa é uma característica positiva, pois o COAM proporciona uma melhor qualidade do solo e eficiência no estoque C. Além da influência do material vegetal aplicado, o N sintético, quando combinado com os resíduos vegetais, possui efeito supressivo sobre a mineralização da

MO no solo, motivos que podem explicar os maiores valores de COT, MOS e ECS dos tratamentos em aléias em relação ao controle (MAHAL *et al.*, 2019). O tratamento com Mombaça exibiu igualdade estatística com o controle em todas as frações de COS analisadas, é possível definir que a aplicação do capim não influenciou significativamente no acúmulo de COS. Para Moura *et al.* (2021), a mistura de biomassas de diferentes qualidades também influencia a permanência do C no solo. Todos os tratamentos que receberam misturas de diferentes qualidades de resíduos exibiram maiores teores de COS em relação ao controle na maioria das frações analisadas, tais resultados permitem destacar o potencial dos resíduos de leguminosas de alta e baixa relação C/N para o estoque de carbono no solo.

É importante salientar que um aumento nos estoques de carbono do solo é perceptível somente após alguns anos da implantação do sistema em aléias, o estabelecimento desse sistema pode ser benéfico de forma permanente e assim que estabelecido precisa ser manejado para que os níveis de COS permaneçam estáveis (AGUIAR *et al.*, 2019; CELENTANO *et al.*, 2020; IVEZIC *et al.*, 2022). Além do aumento nos níveis de COS, esse tipo de sistema agroflorestal aumenta a abundância, funcionalidade e diversidade microbiana quando comparado a cultivos em monoculturas, e é esperado que contribua para o aumento da fertilidade biológica do solo (MOURA *et al.*, 2015; MOURA *et al.*, 2020; BEULE *et al.*, 2022).

6.3 Resistência do Solo à Penetração

O solo dos tratamentos em aléias e o tratamento com resíduos de Mombaça exibiram menor resistência do solo à penetração em relação ao controle na profundidade 7,5 cm, pode-se observar na figura 3 que o tratamento controle foi o único a alcançar uma faixa alta de resistência à penetração (1,14 Mpa) para essa profundidade, faixa considerada alta, segundo a classificação de Hazelton & Murphy (2007). As diferenças em relação ao controle podem ser explicadas pela constante reposição de resíduos vegetais de leguminosas presente nas aléias e Mombaça, que podem ter elevado os teores de umidade do solo e contribuído para as melhorias nas propriedades físicas do solo (MURPHY, 2015). Os efeitos positivos da aplicação dos resíduos de leguminosas sobre a RP foram relatados por Moura *et al.* (2012, 2016), principalmente no aumento do volume de solo adequado para o crescimento de raízes, fator importante para um melhor desenvolvimento e produtividade das culturas.

6.4 Análise Química do Solo

Para os resultados da análise de cátions no solo, todos tratamentos que receberam resíduos de leguminosas foram superiores ao controle, Ca e Mg foram os cátions presentes em maior quantidade na camada de solo analisada, os tratamentos em aléias foram superiores ao tratamento controle e Mombaça, essa diferença é explicada devido à alta taxa de liberação de nutrientes presentes nos resíduos de Leucena e Gliricídia e ao balanço de resíduos de boa e de baixa qualidade das outras combinações utilizadas, que permitem um maior tempo de liberação desses nutrientes (CONRAD *et al.*, 2018; PORTELA *et al.*, 2018, BANEGAS *et al.* 2021). Os valores de SB podem explicados também pela reciclagem de nutrientes proporcionados pelas leguminosas e a formação de pontes de cátions, resultado da interação entre cátions polivalentes e grupos funcionais da MOS (MOURA *et al.*, 2015; SENA *et al.*, 2020).

Entre os cátions analisados, o K foi o que apresentou menores quantidades no solo e o que menos contribuiu para os valores de SB. Esses valores de K podem ser explicados devido ao fato desse nutriente ser facilmente lixiviado, independente do grau de mineralização ou decomposição dos resíduos vegetais, explicando o porquê de uma menor quantidade em relação aos outros cátions no solo, K também não é metabolizado, formando complexos fracos com moléculas orgânicas (ROSOLEM *et al.*, 2021).

O tratamento com resíduos de Mombaça não exibiu diferenças estatísticas em relação ao controle, a média desse tratamento para conteúdo de SB em relação ao controle foi estatisticamente igual. A baixa quantidade de resíduos aplicada (2 Mg ha^{-1}) aplicados pode explicar o motivo dessa igualdade estatística com o controle. Pereira *et al.* (2016) e Dias *et al.* (2020) avaliaram a taxa de liberação de N, P e K na biomassa de cobertura morta de Mombaça, e os autores relataram que a maior taxa de liberação desses nutrientes ocorreu durante os primeiros 30 dias, aos 120 dias após o corte dessas plantas, mais de 60% dos nutrientes tinham sido liberados por meio da cobertura morta. O potencial de reciclagem de Ca, K, Mg e P por *Panicum maximum* e outras forrageiras já foram mencionados também em outras pesquisas (BERNARDES *et al.*, 2010; FIALHO, 2012; MENDONÇA *et al.*, 2015).

6.5 Componentes de Produtividade do Milho

O impacto dos serviços ecossistêmicos proporcionados pela combinação entre a aplicação dos ramos de leguminosas, ureia e cálcio aplicados no solo, além do estoque de C no solo e boa capacidade em reter nutrientes, influencia na produtividade de culturas (MOURA *et al.*, 2021). A combinação S+G foi a que apresentou maiores quantidades de grãos por metro (1361 grãos m⁻¹), S+G e A+G foram estatisticamente superiores aos demais tratamentos para a variável massa de 100 grãos (33,47 g) e S+G, A+G e S+L foram estatisticamente superiores ao controle para a variável produtividade, o tratamento S+G produziu 3 Mg ha⁻¹ de grãos a mais em relação ao controle.

A produtividade de grãos de milho está intimamente relacionada ao peso e quantidade de grãos produzidos, deficiências nutricionais nas plantas antes do período de floração influenciam diretamente o peso e número de grãos por espiga, dessa forma, a variável grãos por metro serve como indicador do estado nutricional das plantas de milho (ANDRADE *et al.*, 2002). É de grande importância o suprimento contínuo de N durante todo o ciclo das plantas de milho, a lenta liberação desse nutriente durante o cultivo dessa cultura influencia sua produtividade (LIU *et al.*, 2020), isso pode explicar o motivo de todos os tratamentos em aléias terem apresentado quantidades maiores de grãos por metro em relação ao controle. A mistura de leguminosas de alta decomposição com resíduos de alta relação C/N é a ótima alternativa para imobilizar o N presente na biomassa aplicada no solo, pois o N das leguminosas de baixa relação C/N seria imobilizado por microrganismos responsáveis pela decomposição dos resíduos de alta relação C/N, que conseqüentemente estaria disponível durante o estágio vegetativo e reprodutivo da cultura do milho.

As combinações A+L e L+G foram as responsáveis pelas menores quantidades de grãos por metro nas fileiras de milho entre os tratamentos que receberam resíduos de leguminosas. A menor quantidade de grãos no tratamento L+G pode ser explicada pela menor persistência do N no solo. Segundo Handayanto *et al.* (1995), Beedy *et al.* (2010) e Peng *et al.* (2013), 30% do N presente nos resíduos de *Gliricídia* aplicados no solo são liberados nos primeiros sete dias e 70% dentro de três semanas, dessa forma, a rápida decomposição pode ter influenciado a persistência do N no solo.

Em um estudo que se avaliou a produtividade de milho através da contribuição de diferentes combinações da aplicação de resíduos de leguminosas com alta qualidade de resíduos (*Gliricídia*) e alta relação C/N (*Peltophorum dasyrrachis*), Handayanto *et al.* (1997) observaram

que houve uma diminuição da taxa de mineralização de N proveniente das misturas de podas à medida que se aumentava a quantidade de resíduos de *Peltophorum* nas misturas, indicando que a taxa de mineralização de N das podas das plantas pode ser manipulada com a mistura de biomassa de diferentes qualidades.

Os tratamentos S+L, A+G e S+L foram os únicos estatisticamente diferentes do controle, S+L e A+G foram os tratamentos que receberam biomassa de gliricídia misturadas com leguminosas de alta relação C/N, e influenciaram, de forma positiva, a produtividade do milho. A Gliricídia possui uma baixa relação C/N em seu tecido, o processo de decomposição e mineralização de seu tecido é diretamente influenciado pelo manejo do solo combinado com a adição de fertilizantes nitrogenados e cátions polivalentes. A aplicação dos ramos podados ao solo resulta em ótimo substrato para o crescimento microbiano, que influencia a liberação de nutrientes para as plantas cultivadas em aléias por meio do ciclo da biomassa microbiana, essa liberação ajuda a recuperar o balanço biológico do solo e melhora sua qualidade (LOSS *et al.* 2010; APOLINÁRIO *et al.* 2016; PRIMO *et al.* 2018).

A contribuição de Gliricídia para a fertilidade do solo, além da combinação com aplicação de fertilizantes nitrogenados, se deve a capacidade dessa leguminosa em capturar N das camadas do solo que são inacessíveis às culturas em consórcio e a deposição de N por meio da liteira, podas de seus galhos e sua decomposição. O sistema radicular dessa leguminosa pouco afeta o milho, pois apenas 10% de suas raízes ficam localizadas na camada superior do solo (0-20 cm), parte onde a maioria das raízes do milho ficam concentradas (AKINNIFESI *et al.*, 2007; SILESHI *et al.*, 2020).

Dentre as combinações de leguminosas, os tratamentos que menos contribuíram para a produtividade de milho foram combinações Acácia + Leucena e Leucena + Gliricídia. Segundo Xuan *et al.*, (2006) mimosina é a principal substância alelopática dos tecidos da Leucena, os autores relataram quantidades de mimosina que corresponderam a 2,66% da massa seca de folhas jovens dessa planta, quantidades superiores as outras espécies da família Mimosaceae. Williams & Hoagland (2007) observaram que essa substância reduziu a germinação de 40% das sementes de trigo em ensaios conduzidos laboratório, também influenciando a inibição de clorofila e crescimento radicular. Luz *et al.* (2010) estudaram o efeito dos triterpenóides lupenona (3-oxolup-20(29)-eno) e lupeol (3 β -hidroxilup-20(29)-eno) nas folhas de *Acácia mangium*, segundo esses autores, em condições de solos ácidos, como é o caso dos solos tropicais da Amazônia, a tendência é de que lupenona apresente maior desempenho em termos

de alelopatia. Ainda segundo os autores, essa substância influencia a germinação de sementes e crescimento da radícula em diversas espécies.

Segundo Moura *et al.* (2010), para se obter uma alta produtividade nas condições dos solos maranhenses com predisposição a coesão e baixa fertilidade natural, é necessário uma constante liberação de N e K no solo durante todo o ciclo da cultura, essa característica é mais importante que a rápida disponibilidade desses nutrientes, pois um dos principais problemas dos solos maranhenses é a lixiviação de nutrientes devido suas características físicas e chuvas intensas em maior parte do estado, principalmente nas regiões localizadas no trópico úmido. A constante liberação de nutrientes no solo é obtida com a combinação de espécies de alta e baixa qualidade de resíduos, tal característica também influencia as condições físicas do solo e como resultado proporcionam condições adequadas para a produção agrícola.

6.6 Análise dos Componentes Principais (ACP)

Entre as variáveis observadas na análise dos componentes principais, os que mais se correlacionaram com o COAM foram o qMic ($r = 0,78$) e o Ca ($r = 0,76$), a associação do CAM com o cálcio pode ser explicada devido a influência do cálcio na proteção da MO, alguns autores relatam a influência do cálcio e outros cátions polivalentes na estabilização, acúmulo e proteção da MO por meio da interação desses cátions com grupos funcionais da matéria orgânica do solo, resultando na formação de pontes catiônicas e retenção dos cátions no solo, segundo os autores, essa ligação seria carregada negativamente e menos acessível para a atividade microbiana (POFFEBARGER *et al.*, 2017; LAVALLEE *et al.*, 2020; GEORGIU *et al.*, 2022). A correlação do COAM com o quociente microbiano pode ser explicada devido a maior parte do carbono orgânico associado ao mineral ser de origem microbiana (DOHNALKOVA *et al.*, 2022)

Entre os componentes principais estudados, observa-se que maior parte das variáveis analisadas estavam ligadas aos tratamentos em aléias, a variável produtividade apresentou forte correlação positiva com o COT ($r = 0,81$) e COP ($r = 0,78$), a relação entre as frações da matéria orgânica e a produtividade pode estar ligada a uma melhoria nas propriedades físicas do solo por meio do incremento de MO, que aumenta a zona enraizável do solo para as culturas e leva a uma eficiência na absorção de nutrientes (MOURA *et al.*, 2013; RAMOS *et al.*, 2018). Os tratamentos S+G e A+G, entre os tratamentos em aléias, foram os que demonstraram maiores valores de produtividade e COP, a ligação desses tratamentos com essas duas variáveis

demonstram a eficiência da mistura da aplicação de resíduos de leguminosas de diferentes qualidades, pois contribuem para uma maior liberação de nutrientes no solo e uma cobertura morta eficiente durante todo o ciclo de cultivo do milho (SENA et al., 2020; AGUIAR et al., 2019). O agrupamento do COT, COP e produtividade no mesmo quadrante indica uma forte associação das frações de carbono e o rendimento do milho, essa correlação ocorreu nas áreas que receberam resíduos de leguminosas, houve também uma relação do COAM com conteúdo de cátions em um dos quadrantes, isso significa que estabilização da MO, reciclagem de cálcio e produção de biomassas de leguminosas influenciaram a produtividade do milho.

7 CONCLUSÕES

No geral, o tratamento S+G (Sombreiro + Gliricídia) foi o mais eficiente para destacar o uso de leguminosas arbóreas para a produtividade de milho e atributos de carbono orgânico do solo, as diferentes combinações de leguminosas exibiram valores maiores que o controle para a maioria dessas variáveis. A maior parte dos tratamentos que receberam mulching de leguminosas exibiram valores significativos de atividade microbiana, L+G exibiu os maiores valores de qMic (10,05%), que indica uma maior incorporação do COS na biomassa microbiana entre os tratamentos em aléias. O tratamento com a aplicação dos resíduos de capim Mombaça foi estatisticamente inferior aos tratamentos com resíduos de leguminosas para maioria das variáveis de COS, conteúdo de cátions e produtividade.

Tais resultados permitem destacar as vantagens do uso de leguminosas de diferentes qualidades de resíduos, somado à aplicação de cálcio e N sintético no estoque de carbono e nas melhorias da fertilidade do solo nas condições dos solos do trópico úmido.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A. C. F.; SOUZA, E. A.; CARDOSO-SILVA, A. J.; & MOURA, E. G. How leguminous biomass can increase yield and quality of maize grain in tropical agrosystems. *Legume Research*, 42, 1-7. 2019.
- AGUIAR, A.C.F.; BICUDO, S.J.; COSTA SOBRINHO, J.R.S.; MARTINS, A.L.S.; COELHO, K.P.; MOURA, E.G. Nutrient recycling and physical indicators of an alley cropping system in a Sandy loan soil in the Pre-Amazon region of Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 86, p.189-198, 2010.
- AITA, C. Dinâmica do nitrogênio no solo durante a decomposição de plantas de cobertura: efeito sobre a disponibilidade de nitrogênio para a cultura em sucessão. In: FRIES, M. R.; DALMOLIN, R. S. D. **Atualização em recomendação de adubação e calagem: ênfase em plantio direto**. Santa Maria: UFSM/Depto de Solos, p.76-111, 1997.
- AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Plantas de cobertura de solo em sistemas agrícolas. In: ALVES, B. J. R. *et al.* (ed). **Manejo de sistemas agrícolas impacto no sequestro de C e nas emissões de gases de efeito estufa**. Porto Alegre: Genesis, 2006. cap. 3, p. 59-79.
- AKINNIFESI, F.K.; KANG, B.T.; LADIPO, D.O, Structural root form and fine root distribution of some woody species evaluated for agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, V.42, p. 121-138, 1999.
- AKINNIFESI, F. K., MAKUMBA, W., SILESHI, G., AJAYI, O. C., & MWETA, D. Synergistic effect of inorganic N and P fertilizers and organic inputs from *Gliricidia sepium* on productivity of intercropped maize in Southern Malawi. *Plant and Soil*, 294(1), 203-217, 2007.
- ALEXANDER, M. Organic matter decomposition. In: Alexander, M. **Introduction to soil microbiology**. New York: J. Willey, p.128-147, 1977.
- ALLISON, L. (1965). **Organic carbon. Methods of soil analysis: Part 2 Chemical and microbiological properties**, 9, 1367-1378.
- ALVES, T. D. S.; CAMPOS, L. L.; ELIAS NETO, N.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. *Acta Scientiarum. Agronomy*, Maringá, v. 33, n. 2, 2011.
- AMELUNG, W., BOSSIO, D., DE VRIES, W., KÖGEL-KNABNER, I., LEHMANN, J., AMUNDSON, R., BOL, R., COLLINS, C., LAL, R., LEIFELD, J., MINASNY, B., PAN, G., PAUSTIAN, K., RUMPEL, C., SANDERMAN, J., VAN GROENIGEN, J. W., MOONEY, S., VAN WESEMAEL, B., WANDER, M., & CHABBI, A. (2020). Towards implementing a global scale soil climate mitigation strategy. *Nature Communications*, 11, 5427.
- ARAÚJO, A.S.F; MONTEIRO, R.T.R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. *Bioscience Journal*, v.23. n.3, p.66-75, 2007.
- APOLINÁRIO, V. X., DUBEUX JR, J. C., LIRA ET. AL. Decomposition of arboreal legume fractions in a silvopastoral system. *Crop Science*, v. 56, n. 3, p. 1356-1363, 2016.
- BABUR, E. (2019). Effects of parent material on soil microbial biomass carbon and basal respiration within young afforested areas. *Scandinavian journal of forest research*, 34(2), 94-101.
- BANEGAS, N. R., VIRUEL, N., & RADRIZZANI, A. Soil Organic Carbon and Total Nitrogen in a *Leucaena leucocephala* Silvopastoral System in the Chaco Region, Argentina, 2021.
- BARRETO, A. C., & FERNANDES, M. F. Use of *Gliricidia sepium* and *Leucaena leucocephala* in alley cropping systems to improve Brazilian coastal tableland soils. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 36, n. 10, p. 1287-1293, 2001.

- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: GENESIS, 1999. p. 9-23.
- BEEDY, T. L., SNAPP, S. S., AKINNIFESI, F. K., & SILESHI, G. W. Impact of *Gliricidia sepium* intercropping on soil organic matter fractions in a maize-based cropping system. **Agriculture, ecosystems & environment**, 138(3-4), 139-146, 2010.
- BERNARDES, T. G., DA SILVEIRA, P. M., MESQUITA, M. A. M., DE AGUIAR, R. A., & MESQUITA, G. M. Decomposição da biomassa e liberação de nutrientes dos capins braquiária e mombaça, em condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 3, p. 370-377, 2010.
- BEULE, Lukas; VAUPEL, Anna; MORAN-RODAS, Virna Estefania. Abundance, Diversity, and Function of Soil Microorganisms in Temperate Alley-Cropping Agroforestry Systems: A Review. **Microorganisms**, v. 10, n. 3, p. 616, 2022.
- BRADFORD, M. A.; & CROWTHER, T. W. Carbon use efficiency and storage in terrestrial ecosystems. **New Phytologist**, v. 199, n. 1, p. 7-9, 2013.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**, 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. (trad. de I.F. Lepsch). cap. 9, p.299-323.
- CAMPOS, A.; SUÁREZ, G.; LABORDE, J. Analyzing vegetation cover-induced organic matter mineralization dynamics in sandy soils from tropical dry coastal ecosystems. **Catena**, v. 185, p. 104264, 2020.
- CASIDA, L.E.; KLEIN, D.A.; SANTORO, T. Soil dehydrogenase activity. **Soil Science**, v.98, p.371-376, 1964.
- CELENTANO, D.; ROUSSEAU, G. X.; PAIXÃO, L. S.; LOURENÇO, F.; CARDOZO, E. G.; RODRIGUES, T. O.; ... & DE OLIVEIRA REIS, F. Carbon sequestration and nutrient cycling in agroforestry systems on degraded soils of Eastern Amazon, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 5, p. 1781-1792, 2020.
- CONRAD, K., DALAL, R. C., FUJINUMA, R., & MENZIES, N. W. Soil organic carbon and nitrogen sequestration and turnover in aggregates under subtropical leucaena–grass pastures. **Soil Research**, 56(6), 632-647, 2018
- CORNEJO, J.; HERMOSÍN, M. C. Interaction of Humic Substances and Soil Clays. In: PICCOLO, A. (Ed.) **Humic substances in terrestrial ecosystems**. Amsterdam: Elsevier, 1996. p.595-624.
- COTRUFO, M. F., RANALLI, M. G., HADDIX, M. L., SIX, J., & LUGATO, E. (2019). Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. **Nature Geoscience**, 12(12), 989-994.
- COTRUFO, F. M., WALLENSTEIN, M. D., BOOT, C. M., DENEFF, K., PAUL, E., (2013). The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? **Global Change Biology**, 19, 988–995.
- DA COSTA LEITE, R.; DONIZETTI DOS SANTOS, J. G.; DA COSTA LEITE, R.; FERNANDES SOUSA, L.; DE SOUSA SOARES, G. O.; FERNANDES RODRIGUES, L.; ... & CLEMENTINO DOS SANTOS; A. Leguminous Alley Cropping Improves the Production, Nutrition, and Yield of Forage Sorghum. **Agronomy**, v. 9, n. 10, p. 636, 2019.
- DOHNALKOVA, A. C., TFAILY, M. M., CHU, R. K., SMITH, A. P., BRISLAWN, C. J., VARGA, T., ... & BALOGH-BRUNSTAD, Z. Effects of Microbial-Mineral Interactions on Organic Carbon Stabilization in a Ponderosa Pine Root Zone: A Micro-Scale Approach. **Frontiers in Earth Science**, 10(PNNL-SA-167716), 2022.
- DALMONECH, D.; MARANO, G.; AMTHOR, J.; CESCATTI, A.; TROTTA, C.; & COLLALTI, A. No leeway to enhance carbon sequestration and stock capacity via changes to forest management. *bioRxiv*. 2022.
- DE CASTRO DIAS, M. B., DE PINHO COSTA, K. A., DA COSTA SEVERIANO, E., BILEGO, U. O., NETO, A. E. F., ALMEIDA, D. P., ... & VILELA, L. Brachiaria and Panicum maximum in an integrated crop–livestock

system and a second-crop maize system in succession with soybean. **The Journal of Agricultural Science**, v. 158, n. 3, p. 206-217, 2020.

DIAS, A. S.; DIAS, L. S.; & PEREIRA, I. P. Defensive role of allelopathic secondary compounds in plants: a review of data on two independent general hypotheses. **Journal of Allelochemical Interactions**, v. 4, n. 1, p. 9-22, 2018

DICK, R. P. (Ed.). (2020). *Methods of soil enzymology* (Vol. 26). John Wiley & Sons.

DING, X.; HAN, X.; LIANG, Y.; QIAO, Y.; LI, L.; LI, N. Changes in soil organic carbon pools after 10 years of continuous manuring combined with chemical fertilizer in a Mollisol in China. **Soil & Tillage Research**, v. 122, p 36-41, 2012.

DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, 1994. (Special publication, 35)

DOS SANTOS; C. C.; SOUZA DE LIMA FERRAZ JUNIOR; A.; OLIVEIRA SÁ, S.; ANDRÉS MUÑOZ GUTIÉRREZ, J.; BRAUN, H.; SARRAZIN, M.; ... & DESJARDINS, T. Soil carbon stock and Plinthosol fertility in smallholder land-use systems in the eastern Amazon, Brazil. **Carbon Management**, v. 9, n. 6, p. 655-664, 2018.

EDWARDS, A.P.; BREMNER, J.M. Microaggregates in soils. **Journal of Soil Science**, London, v.18, n.1, p.64-73, 1967.

ELLERBROCK, Ruth H.; GERKE, Horst H. Explaining soil organic matter composition based on associations between OM and polyvalent cations. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 181, n. 5, p. 721-736, 2018.

ELLERBROCK, Ruth H.; GERKE, Horst H. FTIR spectral band shifts explained by OM-cation interactions. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 184(3), 388-397.2021.

ESPÍNDOLA, J. A. A. **Avaliação de leguminosas herbáceas perenes usadas como cobertura viva do solo e sua influência sobre a produção de bananeira (*Musa spp.*)**. 2001. 144 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, 2001.

ESPÍNDOLA, J. A. A. **Estratégias para utilização de leguminosas para adubação verde em unidades de produção agroecológica**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2004. 24 p.

ESPÍNDOLA, J. A. A.; GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. L.; TEIXEIRA, M. G.; URQUIAGA, S. Decomposição e liberação de nutrientes acumulados em leguminosas herbáceas perenes consorciadas com bananeiras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.321-328, 2006.

FEITOSA, A. L. P. M., SIQUEIRA, G. M., DE MOURA, E. G., FARIAS, F. F., & AGUIAR, A. D. C. F. Linkages among Soil Fertilization Regimes, Chemical Properties and Maize Grains Yield in Humid Tropic. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 16, p. e366101623558-e366101623558, 2021.

FERRAZ, JR. A. S. L. O cultivo em aleias como alternativa para a produção de alimentos na agricultura familiar do tropico úmido. In: MOURA, E. G. (org). **Agroambientes de transição- Entre o trópico úmido e o semiárido do Brasil. Atributos; alterações; uso na produção familiar**. São Luís: UEMA. p. 71-100. 2004.

FIALHO, C. M. T.; SILVA, A. A.; FARIA, A. T.; TORRES, L. G.; ROCHA; P. R. R. & SANTOS, J. B. Teor foliar de nutrientes em plantas daninhas e de café cultivadas em competição. **Planta daninha**, v. 30, n. 1, p. 65-73, 2012.

GERKE, J. Carbon Accumulation in Arable Soils: Mechanisms and the Effect of Cultivation Practices and Organic Fertilizers. **Agronomy**, v. 11, n. 6, p. 1079, 2021.

GEORGIU, K., JACKSON, R. B., VINDUŠKOVÁ, O., ABRAMOFF, R. Z., AHLSTRÖM, A., FENG, W., ... & TORN, M. S. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon. **Nature communications**, 13(1), 3797, 2022.

- GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005, 653 p.
- GOMES DE MOURA, E. (2004). *Agroambientes de transição: entre o trópico úmido e o semi-árido do Brasil* (No. IICA-P01 122). IICA, São Luis (Brasil).
- GUERRA AJT, FULLEN MA, JORGE MCO, BEZZERA JFR, SHOKR SM. Slope processes, mass movements and soil erosion: a review. **Pedosphere** 27(1):27–41. 2017.
- HANDAYANTO E., CADISCH G. AND GILLER K.E. Manipulation of quality and mineralization of tropical legume tree prunings by varying nitrogen supply. **Plant Soil** 176: 149–160. 1995.
- HANDAYANTO, E.; GILLER, K. E.; CADISCH, G. Regulating N release from legume tree prunings by mixing residues of different quality. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 29, n. 9-10, p. 1417-1426, 1997.
- HAYES, Michael HB; SWIFT, Roger S. Vindication of humic substances as a key component of organic matter in soil and water. **Advances in Agronomy**, v. 163, p. 1-37, 2020.
- HAYNES R. J. The decomposition process: Mineralization, immobilization, hummus formation and degradation. **Academic Press** 1986; 52-176
- HAZELTON, P., & MURPHY, B. (2007). *Interpreting soil test results. What do all the numbers mean?* CSIRO Publishing, Australia.
- HOEGH-GULDBERG, O.; JACOB, D.; BINDI, M.; BROWN, S.; CAMILLONI, I.; DIEDHIU, A.; ... & ZOUGMORÉ, R. B. Impacts of 1.5 C global warming on natural and human systems. World Meteorological Organization Technical Document. 2018
- HORN, E. L.; COOLEGE, E. C.; JONES, D. L.; HOYLE, F. C.; BRAILSFORD, F. L.; & MURPHY, D. V. Addition of base cations increases microbial carbon use efficiency and biomass in acidic soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 161, p. 108392, 2021.
- IVEZIĆ, Vladimir; LORENZ, Klaus; LAL, Rattan. Soil Organic Carbon in Alley Cropping Systems: A Meta-Analysis. **Sustainability**, v. 14, n. 3, p. 1296, 2022.
- JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal on metabolism in soil: V. Method for measuring soil biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v.8, n. 3, p. 209-213, 1976.
- KANG, B.T., WILSON, G.F., LAWSON, T.L. **Alley cropping: a stable alternative to shifting cultivation**. Ibadan - Nigeria: International Institute of Tropical Agriculture, 42p. 1984.
- KOTTEK, M., GRIESER, J., BECK, C., RUDOLF, B., & RUBEL, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated.
- KUMMER, L.; *et al.* Respiração e biomassa microbiana em solo sob diferentes sistemas de uso. **Scientia Agraria**, Curitiba. v. 9, n. 4, p. 559-563, 2008.
- LAVALLEE, JOCELYN M.; SOONG, JENNIFER L.; COTRUFO, M. FRANCESCA. 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.
- LEE, S. H., KIM, M. S., KIM, J. G., & KIM, S. O. (2020). Use of soil enzymes as indicators for contaminated soil monitoring and sustainable management. *Sustainability*, 12(19), 8209.
- LI, M., HU, H., HE, X., JIA, J., DROSOS, M., WANG, G., ... & XI, B. Organic carbon sequestration in soil humic substances as affected by application of different nitrogen fertilizers in a vegetable-rotation cropping system. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 67, n. 11, p. 3106-3113, 2019.
- LORENZ, KLAUS; LAL, RATTAN. **Carbon sequestration in forest ecosystems**. Springer Science & Business Media, 2009.

- LOSS A, MORAES AGL, PEREIRA MG, SILVA EMR, ANJOS LHC. Carbono, matéria orgânica leve e frações oxidáveis do carbono orgânico sob diferentes sistemas de produção orgânica. **Comunicata Scientiae**.;1:57-64. 2010.
- LULL, C., BAUTISTA, I., LIDÓN, A., DEL CAMPO, A. D., GONZÁLEZ-SANCHIS, M., & GARCIA-PRATS, A. (2020). Temporal effects of thinning on soil organic carbon pools, basal respiration and enzyme activities in a Mediterranean Holm oak forest. **Forest Ecology and Management**, 464, 118088.
- LUZ, S. D. M.; SOUZA FILHO, A. P. D. S.; GUILHON, G. M. S. P.; & VILHENA, K. D. S. D. S. Atividade alelopática de substâncias químicas isoladas da Acacia mangium e suas variações em função do pH. **Planta Daninha**; v. 28, n. 3, p. 479-487, 2010.
- MAFRA, A.L. *et al.* Produção de fitomassa e atributos químicos do solo sob cultivo em aléias e sob vegetação nativa de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.22, p.43-48, 1998.
- MANN, C., LYNCH, D., FILLMORE, S., & MILLS, A. (2019). Relationships between field management, soil health, and microbial community composition. *Applied Soil Ecology*, 144, 12-21.
- MARTINS, A. L. P.; SIQUEIRA, G. M.; DE MOURA, E. G.; SILVA, R. A.; FARIAS, F. F.; & DAS CHAGAS FERREIRA AGUIAR, A. Can different soil fertilization regimes modify soil fauna to interfere in maize grain yield? **Australian Journal of Crop Science**, 14(10), 1541-1548. 2020
- MARTINS, E.L.; CORINGA, J.E.S.; WEBER, O.L.S. Carbono orgânico nas frações granulométricas e substâncias húmicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico LVAd sob diferentes agrossistemas. **Acta Amaz.**, v. 39, p 655-660, 2009.
- MASCIANDARO, G., CECCANTI, B., GALLARDO-LANCHO, J.F. Organic matter properties in cultivated versus set-aside arable soils. **Agriculture Ecosystems and Environment** 67, 267-274, 1998.
- MATHIAS, J. M.; & TRUGMAN, A. T. Climate change impacts plant carbon balance, increasing mean future carbon use efficiency but decreasing total forest extent at dry range edges. **Ecology letters**, v. 25, n. 2, p. 498-508, 2022.
- MATTAR, E. P. L.; DE MORAES, M. D.; FRADE JUNIOR, E. F.; ALÉCIO, M. R.; ORTEGA, G. P. **Sistema de Cultivo em aléias-Manual Técnico**. p. 48. Cruzeiro do Sul, AC, 2013.
- MENDES, Telmo José *et al.* Soil carbon stock estimations: methods and a case study of the Maranhão State, Brazil. *Environment, Development and Sustainability*, v. 23, n. 11, p. 16410-16427, 2021.
- MENDONÇA, E. D. S.; MATOS, E. D. S. **Matéria Orgânica do solo**: métodos de análises. Viçosa: UFV, 2005
- MENDONÇA, E.S. & STOTT, D.E. Characteristics and decomposition rates of pruning residues from a shaded coffee system in Southeastern Brazil. **Agrofor. Syst.**, 57:117-125, 2003.
- MENDONÇA, V. Z. D., MELLO, L. M. M. D., ANDREOTTI, M., PARIZ, C. M., YANO, É. H., & PEREIRA, F. C. B. L. Liberação de nutrientes da palhada de forrageiras consorciadas com milho e sucessão com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 183-193, 2015.
- MINASNY B, MALONE BP, MCBRATNEY AB, ANGERS DA, ARROUAYS D, CHAMBERS A, CHAPLOT V, CHEN ZS, CHENG K, DAS BS, FIELD DJ *et al.* Soil carbon 4 per mille. **Geoderma** 292:59–86. 2017.
- MINASNY, B.; MALONE, B. P.; MCBRATNEY, A. B.; ANGERS, D. A.; ARROUAYS, D.; CHAMBERS, A.; ... & WINOWIECKI, L. Soil carbon 4 per mille. **Geoderma**, 292, 59-86. 2017
- MORTLAND, M.M. Clay-organic complexes and interactions. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.22, p.75-117, 1970.

- MOURA, E. G.; AGUIAR, A. C. F.; PIEDADE, A. R.; ROUSSEAU, G. X. The contribution of legume tree residues and macrofauna to the improvement of abiotic soil properties in the eastern Amazon. **Applied Soil Ecology**. p. 91–99, 2015.
- MOURA, E. G.; CARVALHO, C. S.; BUCHER, C. P.; SOUZA, J. L.; AGUIAR, A. C.; FERRAZ JUNIOR, A. S.; ... & COELHO, K. P. Diversity of rhizobia and importance of their interactions with legume trees for feasibility and sustainability of the tropical agrosystems. **Diversity**, v. 12, n. 5, p. 206, 2020.
- MOURA, E. G.; DAS CF AGUIAR, A.; PIEDADE, A. R.; & ROUSSEAU, G. X. Contribution of legume tree residues and macrofauna to the improvement of abiotic soil properties in the eastern Amazon. **Applied Soil Ecology**, 86, 91-99. 2015.
- MOURA, E. G.; MARQUES, E. S.; SILVA, T. M. B.; PIEDADE, A. R. & AGUIAR, A. C. F. Interactions among leguminous trees, crops and weeds in a no-till alley cropping system. **International Journal of Plant Production**, v. 8, n. 4, p. 441-456, 2014.
- MOURA, E. G.; SOUSA, R. M; CAMPOS, L. S.; CARDOSO-SILVA, A. J.; MOONEY, S. J.; AGUIAR, A. C. F. 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. **Atributos físico-hídricos e de fertilidade de um PVA distrófico da formação Itapecuru em São Luís, Ma, que afetam o crescimento do milho (*Zea mays L.*)**. Botucatu, Universidade Estadual Paulista, Tese de doutorado, 1995.
- MOURA, E.G., SENA, V.G., CORRÊA, M.S., AGUIAR, A.C.F. The importance of an alternative for sustainability of agriculture around the periphery of the Amazon rainforest. **Recent Patents Food Nutrition & Agriculture**. p. 70-78, 2013.
- MOURA, E.G; SILVA, A. F; FURTADO, M; AGUIAR, A. C. Avaliação de um sistema de cultivo em aléias em um argissolo franco-arenoso da região amazônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2008. 32:1735-1742.
- NANNIPIERI, P., GRECO, S., & CECCANTI, B. (2017). Ecological significance of the biological activity in soil. *Soil biochemistry*, 293-356.
- NASCIMENTO, João T. *et al.* Efeito de leguminosas nas características químicas e matéria orgânica de um solo degradado. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 457-462, Dec. 2003
- NISSANKA, S. P.; SANGAKKARA, U. R. Nutrient cycling, soil properties and physiological and yield responses in a gliricidia–maize alley cropping system in the mid-country intermediate zone of Sri Lanka. **Management of Agroforestry Systems for Enhancing Resource use Efficiency and Crop Productivity**, p. 127, 2008.
- OLIVER, E. E.; HOULTON, B. Z.; & LIPSON, D. A. Controls on soil microbial carbon use efficiency over long-term ecosystem development. **Biogeochemistry**, v. 152, n. 2, p. 309-325, 2021.
- PAVINATO, P.S.; ROSOLEM, C.A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.32, n. 3, p. 911-920, jun. 2008.
- PENG, Y., YU, P., LI, X., & LI, C. Determination of the critical soil mineral nitrogen concentration for maximizing maize grain yield. **Plant and soil**, 372(1), 41-51. 2013.
- PEREIRA F.C.B.L.; MELLO L.M.M.; PARIZ CM.; MENDONÇA V.Z.; YANO E.H.; MIRANDA E.E.V.; & CRUSCIOL C.A.C. Autumn maize intercropped with tropical forages: crop residues, nutrient cycling, subsequent soybean and soil quality. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 40, 1–3, 2016
- PILLON, C. N.; MIELNICZUK, J.; MARTIN NETO, L.; **Dinâmica da matéria orgânica no ambiente**, Embrapa Clima Temperado: Pelotas, 2002, (Documentos, 105)
- POFFENBARGER, H. J., BARKER, D. W., HELMERS, M. J., MIGUEZ, F. E., OLK, D. C., SAWYER, J. E., ... & CASTELLANO, M. J. (2017). Maximum soil organic carbon storage in Midwest US cropping systems when crops are optimally nitrogen-fertilized. **PLoS One**, 12(3), e0172293, 2017.

- PORTELA, L. B., SILVA, A. J. C., DE ARAÚJO SANTOS, G. A., PEDROSA, J. L. F., DE OLIVEIRA, C. D. M. B., & AGUIAR, A. D. C. F. Decomposition and Nutrient Release of Tree Legumes in an Agroforest System. **Journal of Agricultural Science**, 10(8), 2018.
- PRIMO, D. C., MENEZES, R. S. C., ARAUJO FILHO, R. N., DUTRA, E. D., SILVA, E. R., ALVES, R. N., ... & Lucena, E. H. L. Physico-Chemical Characteristics and Carbon Balances in a Fluvic Entisol after Six Years of Fertilization with Manure and Gliricidia. **Journal of Experimental Agriculture International**, 23(4), 1-11, 2018.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, 2021. Vienna: Disponível em:<http://www.r-project.org>. Acesso em: 6.01 de 2021.
- RAMOS; F. T., DORES, E. F. G. C., WEBER, O. L. S., BEBER, D. C; CAMPELO JR, J. H., MAIA, J. C. S., 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), 2018.
- ROSOLEM, Ciro A.; MALLARINO, Antonio P.; NOGUEIRA, Thiago AR. Considerations for unharvested plant potassium. **Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops**, p. 147, 2021.
- ROWLEY, Mike C.; GRAND, Stéphanie; VERRECCHIA, Éric P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. **Biogeochemistry**, v. 137, n. 1, p. 27-49, 2018.
- SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. 491p.
- SENA, V. G.; DE MOURA, E. G.; MACEDO, V. R.; AGUIAR, A. C.; PRICE, A. H.; MOONEY, S. J.; & CALONEGO, J. C. Ecosystem services for intensification of agriculture, with emphasis on increased nitrogen ecological use efficiency. **Ecosphere**, 11(2), e03028. 2020.
- SILESHI G.W., AKINNIFESI F.K., MAFONGOYA P.L., KUNTASHULA E., AJAYI O.C. Potential of *Gliricidia*-Based Agroforestry Systems for Resource-Limited Agroecosystems. In: Dagar J.C., Gupta S.R., Teketay D. (eds) **Agroforestry for Degraded Landscapes**. 2020.
- 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**, Viçosa, MG, v. 34, p. 1585-1592, 2010.
- TINY, G.; LUCAS, M. R.; HENRIQUES, P. D.; & MARTA-COSTA, A. (2022). FAMILY AGRICULTURE, SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND ETHNOGRAPHIC LINEAR PROGRAMMING-A REVIEW. In Economic and Social Development (Book of Proceedings), 78th International Scientific Conference on Economic and Social Development (p. 285).
- TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G. Dinâmica do potássio nos resíduos vegetais de plantas de cobertura no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1609-1618, 2008
- WARDLE, D. A., & GHANI, A. A. (1995). A critique of the microbial metabolic quotient (qCO₂) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development. *Soil Biology and Biochemistry*, 27(12), 1601-1610.
- WILLIAMS RD; HOAGLAND RE. 2007. Phytotoxicity of mimosine and albizziine on seed germination and seedling growth of crops and weeds. **Allelopathy Journal** 19:423-430.
- XUAN, T. D.; ELZAAWELY, A. A.; DEBA, F.; FUKUTA, M.; & TAWATA, S. Mimosine in *Leucaena* as a potent bio-herbicide. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 26, n. 2, p. 89-97, 2006.
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, v. 19, p.1467-1476, 1988.
- ZAHARAH, A. R., & BAH, A. R. Patterns of decomposition and nutrient release by fresh *Gliricidia* (*Gliricidia sepium*) leaves in an ultisol. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 55(3), 269-277, 1999.

ZHA T.S.; BARR A.G.; BERNIER P-Y; LAVIGNE M.B.; TROFYMOW J.A.; AMIRO B.D.; ARAIN M.A.; BHATTI J.S.; BLACK T.A.; MARGOLIS HA *et al.* Gross and aboveground net primary production at Canadian forest carbon flux sites. **Agricultural and Forest Entomology** 174–175: 54–64. 2013

ZHAO, J.S.; CHEN, S.; HU, R.G.; LI, Y.Y. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides. **Soil Tillage Res.** 167, 73–79. 2017.