



Uema
UNIVERSIDADE ESTADUAL
DO MARANHÃO



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA
CENTRO DE ESTUDOS SUPERIORES DE BALSAS - CESBA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E MEIO AMBIENTE -
PPGAA

DYANE DE LIMA GOMES

**ABORDAGEM ECO FISIOLÓGICA PARA AVALIAR A EVOLUÇÃO DO
CARBONO NO SOLO**

Balsas – MA
2023

DYANE DE LIMA GOMES

**ABORDAGEM ECO FISIOLÓGICA PARA AVALIAR A EVOLUÇÃO DO
CARBONO NO SOLO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA/CESBA/UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.

Orientador: Prof. Dsc. Emanuel Gomes de Moura

Coorientadora: Dsc. Katia Pereira Coelho

G633a

Gomes, Dyane de Lima

Abordagem eco fisiológica para avaliar a evolução do carbono no solo. /
Dyane de Lima Gomes. – Balsas, 2023.

63f.

Monografia Curso Pós-graduação em Agricultura e meio ambiente –
PPGAA. Universidade Estadual do Maranhão-UEMA/ Balsas, 2023.

Orientador: Prof. Emanuel Gomes de Moura

1. Sustentabilidade. 2. Matéria. 3. Orgânica Estável. 4. Cátions
Polivalentes. I. Título.

CDU 631.415

Elaborado pela bibliotecária Maria da Consolação Coelho Rocha CRB 13/604

DYANE DE LIMA GOMES

**ABORDAGEM ECO FISIOLÓGICA PARA AVALIAR A EVOLUÇÃO DO
CARBONO NO SOLO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Meio Ambiente – PPGAA/CESBA/UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.

Orientador: Prof. Dsc. Emanuel Gomes de Moura

Coorientação: Dsc. Katia Pereira Coelho

Aprovada em: 27 / 06 / 2023

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



EMANOEL GOMES DE MOURA

Data: 03/07/2023 11:18:24-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Emanuel Gomes de Moura
Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)

Documento assinado digitalmente



ALINNE DA SILVA

Data: 16/08/2023 17:14:50-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Alinne da Silva
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)

Documento assinado digitalmente



ALANA DAS CHAGAS FERREIRA AGUIAR

Data: 06/07/2023 08:07:55-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Alana das Chagas Ferreira Aguiar
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

A Deus, a minha família e ao meu namorado dedico.

“Porque Deus é quem efetua em vós tanto o querer como o realizar, segundo a sua boa vontade”. Filipenses 2:13

AGRADECIMENTOS

Á Deus, a quem concedo todo o mérito das minhas conquistas;

A minha mãe, Leiores de Lima Gomes, meus irmãos Naiane de Lima Gomes e Marcos de Lima Gomes, e meus avôs que sempre foram suporte nas horas difíceis;

Ao meu namorado Emerson Sá, meu porto seguro com quem tenho o prazer de dividir a vida, a pessoa que suporta todas as minhas crises e me incentiva a persistir sempre, sem você eu não teria conseguido, obrigada por acreditar em mim;

Ao meu orientador, professor Emanuel Gomes de Moura e minha coorientadora Katia Pereira Coelho, pelas suas contribuições para o meu crescimento profissional;

A minha amiga, Gabrielly Gonçalves, um dos meus moires presente nesse mestrado e, ao meu amigo Edaciano Lösch, você foi a luz que me permitiu sair desse abismo chamado mestrado, obrigada pela ajuda no campo, no laboratório e por todas as orientações;

A Jéssica, Vanessa e Carol pela ajuda no laboratório, sou grata por poder contar com vocês e fico feliz em saber que a futura geração de cientistas terá ótimos orientadores como vocês;

Aos meus colegas de turma do PPGAA, em especial meu amigo Vinícius Rocha com quem pude dividir os perrengues da caminhada;

Aos amigos que fiz no caminho e a todos que me ajudaram e incentivaram de alguma forma, em especial, Neto, Alzenira, Marcelo, Everton, Pedro, Kalyne e Matheus;

À Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), ao Programa de Pós Graduação em Agricultura e Meio ambiente (PPGAA) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro e prestações de serviços.

RESUMO

Em 2050, a produtividade agrícola precisará ser quase 50% maior que a evidenciada em 2012. Com isso verifica-se a necessidade de um modelo de produção e de desenvolvimento que consiga conciliar o crescimento da agricultura, a conservação e a sustentabilidade dos agroecossistemas. O uso de práticas de manejo capazes de aumentar o conteúdo de matéria orgânica estável no solo são essenciais nesse processo. Práticas como a utilização de biomassa de alta qualidade e a adubação com cátions polivalentes auxiliam nesse processo. Portanto, objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da interação entre a biomassa de alta qualidade com os cátions polivalentes Ca e Si, sob os quocientes biológicos e como esse efeito interfere no acúmulo da fração estável da matéria orgânica do solo. Para que o objetivo seja alcançado as variáveis avaliadas foram o quociente metabólico (qCO₂), quociente microbiano (CBM:C), cálcio e silício. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com oito tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos constituíram arranjos de leguminosas com cálcio, silício e ureia. A combinação de silício mais biomassa de leguminosa foi o tratamento que apresentou maior eficiência do uso do carbono e maior incorporação do carbono orgânico na biomassa microbiana. Todavia, os resultados indicaram que a combinação de biomassa de leguminosas associadas com ambos os cátions polivalentes beneficiou a atividade dos microrganismos, o que refletiu no acúmulo e estabilização do C-org na matéria orgânica do solo.

Palavras-chaves: Sustentabilidade, matéria orgânica estável, cátions polivalentes.

ABSTRACT

In 2050, agricultural productivity will need to be almost 50% higher than that shown in 2012. With this, there is a need for a production and development model that manages to reconcile the growth of agriculture, conservation and sustainability of agroecosystems. The use of management practices capable of increasing the content of stable organic matter in the soil are essential in this process. Practices such as the use of high quality biomass and fertilization with polyvalent cations help in this process. Therefore, the objective of this work was to evaluate the effect of the interaction between high quality biomass and the polyvalent cations Ca and Si, on the biological quotients and how this effect interferes with the accumulation of the stable fraction of soil organic matter. In order to reach the objective, the evaluated variables were the metabolic quotient (qCO_2), microbial quotient (CBM:C), calcium and silicon. The experimental design used was randomized blocks, with eight treatments and four replications. The treatments consisted of arrangements of legumes with calcium, silicon and urea. The combination of silicon plus leguminous biomass was the treatment that showed the highest carbon use efficiency and the highest incorporation of organic carbon in the microbial biomass. However, the results indicated that the combination of leguminous biomass associated with both polyvalent cations benefited the activity of microorganisms, which was reflected in the accumulation and stabilization of C-org in soil organic matter.

Keywords: sustainability, stable organic matter, polyvalent cations.

LISTA DE SIGLAS

CBM - Carbono da biomassa microbiana

qMic – Quociente microbiológico

qCO₂ – Quociente metabólico

Ca – Cálcio

Si – Silício

L – Leguminosa

U – Ureia

C-org – Carbono orgânico

COS – Carbono orgânico do solo

COT – Carbono orgânico total

COP – Carbono orgânico particulado

COAM – Carbono orgânico associado ao mineral

RM – Respiração Microbiana

MOS – Matéria orgânica do solo

SBC – Soma de cátions básicos

CO₂ – Dióxido de carbono

C – Carbono

N – Nitrogênio

P – Fósforo

Al – Alumínio

Fe – Ferro

EUC – Eficiência do uso do carbono

CTC – Capacidade de troca de cátions

DP – Desvio padrão

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Precipitação trimestral do período de condução do experimento.....	37
Figura 2 - Quociente metabólico ($\text{mg C-CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\text{ CBM h}^{-1}$) na profundidade de 0-10 cm.....	42
Figura 3 - Quociente Microbiológico (%) na profundidade de 0-10 cm.....	43
Figura 4 - Frações do carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COAM) nas profundidades de 0 – 10 cm e 10 - 20 cm ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$). O carbono orgânico total (COT) é representado pela soma das duas frações.....	43
Figura 5 - Teores de cálcio disponível (mmol dm^3) no solo nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	44
Figura 6 - Teores de silício disponível (mg dm^{-3}) no solo nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm.....	45
Figura 7 - Correlação Linear de Pearson entre os quocientes biológicos ($q\text{CO}_2$ e $q\text{Mic}$), o fracionamento da matéria orgânica (COT, COP e COAM) e os cátions (Ca e Si) no solo na profundidade 0-10 cm.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades químicas e físicas do solo utilizado no experimento na profundidade de 0-10 cm.....	37
Tabela 2 - Descrição das adubações e plantios dos ciclos experimentais	38

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	13
1 INTRODUÇÃO GERAL	14
2 OBJETIVOS	15
2.1 Geral	15
2.2 Específicos	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Matéria Orgânica do solo e suas frações	16
3.2 Estabilidade da matéria orgânica por meio da interação de cátions polivalentes	17
3.2.1 Cálcio	18
3.2.2 Silício	19
3.3 Atributos biológicos do solo	20
3.3.1 Biomassa microbiana	20
3.3.2 Respiração Microbiana	21
3.3.3 Carbono orgânico do solo	22
3.3.4 Quocientes metabólico e microbiano	23
3.4 Eficiência do uso do Carbono	24
3.5 Nitrogênio	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26
CAPÍTULO II	34
1 INTRODUÇÃO	35
2 MATERIAIS E MÉTODOS	36
2.1 Caracterização da área	36
2.2 Delineamento experimental	38
2.3 Coleta e tratamentos das amostras	39
2.4 Variáveis avaliadas	39
2.4.1 Análise dos cátions polivalentes	39
2.4.2 O fracionamento granulométrico da MOS	39
2.4.3 Quociente metabólico	40
2.4.4 Quociente microbiano	41
2.4.5 Análises estatísticas	41
3 RESULTADOS	42
3.1 Quociente metabólico (qCO₂)	42
3.2 Quociente microbiológico (qMic)	42
3.3 Frações do carbono orgânico	43
3.4 Cálcio trocável	44
3.5 Silício disponível	45
3.6 Correlação entre os parâmetros avaliados	45
4 DISCUSSÃO	46
4.1 Quociente metabólico (qCO₂)	46
4.2 Quociente microbiológico (qMic)	48

4.3	Frações do carbono orgânico	49
4.4	Cálcio trocável	51
4.5	Silício disponível	51
4.6	Correlação entre os parâmetros avaliados	52
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

CAPÍTULO I

REFERENCIAL TEÓRICO

1 INTRODUÇÃO GERAL

Espera-se que a população mundial atinja cerca de 10 bilhões de habitantes até 2050. O crescimento populacional, a sobrevivência dos idosos e o maior poder aquisitivo resultou no aumento na demanda agrícola, exigindo mudanças proporcionais na produção de alimentos, que passaram a ser produzidos em grande escala. No entanto, a aceleração necessária para o crescimento da produtividade muitas vezes tem um alto custo para o meio ambiente, como o aumento das emissões de gases de efeito estufa, desmatamento e degradação da terra. A incidência de desastres naturais aumentou cinco vezes desde a década de 1970 (FAO, 2017; CALICIOGLU *et al.* 2019).

Alguns dos desafios para os sistemas agrícola e alimentar global são: (a) melhorar de forma sustentável a produtividade agrícola para atender à demanda crescente; (b) assegurar uma base sustentável de recursos naturais; (c) abordar as mudanças climáticas e a intensificação dos perigos naturais. Pequenas mudanças no clima, na precipitação anual ou nos padrões sazonais de precipitação podem afetar gravemente a produtividade (CALICIOGLU *et al.* 2019).

Em 2050, a produtividade precisará ser quase 50% maior que a evidenciada em 2012. Desse modo, é necessário buscar um modelo de produção e de desenvolvimento que consiga conciliar o crescimento da agricultura e a conservação dos recursos naturais. O Brasil é o terceiro maior produtor de alimentos do planeta, e espera-se que tenha participação significativa no crescimento da produção agrícola. Todavia, para que a produtividade aumente sem grandes danos ao meio ambiente e perda da qualidade do solo, o desenvolvimento de sistemas de produção mais sustentáveis é essencial (WORLD BANK GROUP, 2016; VIEIRA FILHO *et al.*, 2019).

Em regiões do trópico úmido, como a periferia amazônica, onde situa-se o estado do Maranhão, a sustentabilidade e viabilidade dos agroecossistemas são predominantemente dependentes de um equilíbrio entre a adição/remoção de matéria orgânica do solo (MOS) e a manutenção de uma soma adequada de cátions básicos (SBC) na rizosfera (QUESADA *et al.*, 2020). Nessa região, a degradação do solo ocorre quando o manejo não consegue superar os processos naturais que diminuem o conteúdo de MOS, devido à rápida decomposição e, reduzem a SBC, devido à rápida lixiviação. Logo, a degradação da terra e do ambiente nos trópicos só será evitada com o uso de tecnologias cujas práticas de manejo do solo sejam capazes de aumentar o conteúdo de matéria orgânica estável e a soma de cátions básicos no perfil do solo (MOURA, 2020).

A qualidade do solo e a sustentabilidade agrícola estão associadas ao conteúdo de matéria orgânica e a adoção de práticas sustentáveis. Essas práticas incluem o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, culturas de cobertura e pousio, sistemas agroflorestais entre outras. A longo prazo, estas práticas podem aumentar e/ou manter a quantidade e a qualidade da MOS e conseqüentemente melhorar as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (DORAN & SAFLEY, 1997; LAL, 2004).

O solo é o maior reservatório global de ciclagem ativa de carbono orgânico (C-org), elemento que representa cerca de 58% da massa da matéria orgânica. Manter e aumentar o carbono orgânico do solo através da matéria orgânica é uma das estratégias mais eficientes para mitigar o efeito do aquecimento global causado pelo CO₂ atmosférico. Portanto, adaptar o solo às mudanças climáticas e melhorar a sua qualidade para a agricultura é urgente (TARNOCAI *et al.*, 2009; WALTHALL *et al.*, 2012; HUPPMANN *et al.*, 2018; MOURA, 2020).

Recentemente, o carbono da biomassa microbiana foi reconhecido como um importante precursor para a estabilização do C no solo (COTRUFO, 2013; LEHMANN, 2015). Os microrganismos do solo assimilam o C vegetal para o seu crescimento e liberam CO₂ como produtos extracelulares e, o equilíbrio desse anabolismo e catabolismo é definido como a eficiência do uso do carbono microbiano (EUC).

Nesse sentido, o quociente metabólico e microbiano (qCO₂ e qMic), são capazes de expressar o nível de atividade das populações microbianas do solo e a eficiência de troca CO₂ da atmosfera para a biomassa vegetal, dados que possibilitariam compreender a alocação e a ciclagem do carbono mineral no solo (ALMEIDA *et al.*, 2018; LUO *et al.*, 2020). Posto isso, a hipótese proposta neste estudo é que o uso de biomassa de alta qualidade associada aos cátions básicos são capazes de diminuir o quociente metabólico e aumentar o quociente microbiano e a fração estável da matéria orgânica do solo.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o efeito da interação entre a biomassa de alta qualidade com os cátions polivalentes Ca e Si sob os quocientes biológicos e como esse efeito interfere no acúmulo da fração estável da matéria orgânica do solo.

2.2 Específicos

- (i) Avaliar a resposta dos quocientes biológicos qCO_2 e $qMic$ em solo sob cultivo associado com leguminosas e adubação nitrogenada.
- (ii) Verificar o efeito das interações entre a biomassa de leguminosa e os cátions polivalentes (Ca e Si) sobre o acúmulo da fração estável do carbono do solo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Matéria Orgânica do solo e suas frações

A matéria orgânica do solo (MOS) pode contribuir para a diminuição de CO_2 na atmosfera através do sequestro de carbono. Também fornece benefícios importantes para a agricultura, pois constitui a base fundamental para a produtividade agrícola sustentável, principalmente nos trópicos. Através dos seus efeitos diretos, a MOS é capaz de modular as condições do solo e, conseqüentemente, a eficiência nutricional do mesmo, além de ser considerada um importante indicador correlacionado com a produtividade agrícola no trópico úmido (COSTA, SILVA & RIBEIRO, 2013; MOURA, 2020).

A quantidade, composição e fração de MOS depende da entrada de material orgânico (que pode ser de origem vegetal, animal e de produtos de suas transformações), da sua taxa de mineralização, da textura do solo e do clima, entre outros fatores (BAYER *et al.*, 2000). Áreas sob vegetação nativa tendem a apresentar o teor de MOS em equilíbrio, as quais são modificadas com o uso do solo (KHORRAMDEL *et al.*, 2013). Nos sistemas agrícolas, o manejo adotado tem grande influência nos estoques de MOS. O manejo pode diminuir, manter ou aumentar esses estoques em relação à vegetação nativa (LIU *et al.*, 2003; MOURA, 2020).

As frações da matéria orgânica são divididas entre componentes vivos e não vivos. Os componentes vivos dificilmente ultrapassam 4% do carbono orgânico total do solo (COT) e representam a fitomassa, tecidos de origem vegetal, biomassa microbiana, matéria orgânica associada a células de microrganismos que vivem no solo, biomassa da fauna e, matéria orgânica associada a fauna edáfica. Já os componentes não vivos representam até 98% do COT e compreendem a matéria orgânica particulada e, fragmentos orgânicos com estrutura celular reconhecível derivados de qualquer fonte (SILVA & RESCK, 1997; NELSON & BALDOCK, 1999; SILVA & MENDONÇA, 2007).

A matéria orgânica particulada é dividida em (i) liteira: material orgânico desprovido de material mineral localizado na superfície do solo; (ii) matéria macro orgânica: fragmentos de MO $> 20\mu m$ ou $< 50\mu m$ contidos dentro do solo mineral e tipicamente isolados por

peneiramento em solo disperso; (iii) fração leve: material orgânico isolado dos minerais do solo por flotação de suspensões do solo dispersas em água ou líquidos pesados de densidades entre 1,5 – 2,0 mg m⁻³ e; (iv) fração associada aos minerais: parte da MO associada às frações silte e argila definida como a fração da MOS que interage com a superfície de partículas minerais e que forma os complexos organominerais, protegida pelo mecanismo de proteção coloidal (CAMBARDELLA & ELLIOTT, 1992; NELSON & BALDOCK, 1999; SILVA & MENDONÇA, 2007).

Os demais componentes da matéria orgânica não vivos são a matéria orgânica dissolvida e o húmus, que são materiais orgânicos que permanecem no solo após a decomposição da matéria macrororgânica e da matéria dissolvida. Essas últimas são divididas em biomoléculas não-húmicas, substâncias húmicas (ácido húmico, ácido fúlvico e humina) e matéria orgânica inerte (carvão). A matéria orgânica inerte é constituída por material orgânico altamente carbonizado, como carvão, material vegetal queimado e grafite (SILVA & RESCK, 1997; NELSON & BALDOCK, 1999).

Essas frações da MOS apresentam características diferentes entre si, tanto químicas, quanto físicas e morfológicas. Cada fração tem sua labilidade e grau de estabilização e, quanto mais lábil a fração, mais disponível ela estará para a decomposição pelos microrganismos e, quanto maior o grau de estabilização da fração, mais protegida da decomposição. A proporção dessas frações no conteúdo total da MOS pode dar indicações importantes sobre a qualidade do solo e sobre a sustentabilidade do seu uso. Quanto maior a proporção de frações estáveis, maior a capacidade do solo em suportar cultivos sucessivos. Os diferentes sistemas de manejo ao aportarem ao solo diferentes quantidades de biomassa de qualidade diferentes, alteram a proporção de MOS lábil (menos estável) em relação à de maior grau de estabilização (não lábil e estável) (SALTON *et al.*, 2011).

3.2 Estabilidade da matéria orgânica por meio da interação de cátions polivalentes

A estabilidade da matéria orgânica do solo refere-se à proteção da MO contra a decomposição por microrganismos, o que resulta em acúmulo e persistência da MO no solo (Von LÜTZOW *et al.*, 2006). Os microrganismos utilizam com melhor eficiência a biomassa vegetal, e os produtos derivados da decomposição são considerados os principais percussores para estabilidade da MO (Von LÜTZOW *et al.*, 2006; COTRUFO *et al.*, 2013).

Algumas práticas podem contribuir para a estabilização da MOS, como o aumento no teor de cátions polivalentes no solo e a entradas de biomassa de alta qualidade. A estabilização

da MOS significa reduzir as perdas da MOS pelos processos de respiração, erosão e lixiviação. Nesse sentido, três mecanismos podem conferir a estabilidade da MOS (i) recalcitrância, (ii) oclusão do carbono orgânico do solo (COS) e, (iii) interações organominerais (SOLLINS *et al.*, 1996).

A estabilização da MOS por meio de interações organominerais resulta em complexos organominerais ou organo-cátions. Essa estabilização se dá pela interação entre COS e componentes inorgânicos do solo, principalmente cátions polivalentes, e é responsável pela persistência do C no solo (ROWLEY *et al.*, 2018). Esses mecanismos ocorrem em todos os solos e, de acordo com Tipping (2005), cada grupo carboxila (C=O) na MO representa um parceiro individual para a interação com um sítio de coordenação de um cátion polivalente (Ca, Si, Mg, Al, Fe, Mn, etc.).

Os Cátions são átomos que possuem carga positiva por apresentar mais prótons do que elétrons. A natureza dos cátions afeta a preferência de troca no solo de acordo com a sua densidade de carga e, os com maior densidade de carga são mais facilmente retidos no solo. As associações entre MO e os cátions polivalentes são baseadas principalmente na troca de ligantes e nas interações doador-aceptor de elétrons. Essas associações podem ser (a) organo-cátion, associação da MO e cátions como Ca^{+2} e Si^{+2} , (b) organo-cátion-mineral, que geram pontes de cátions entre o MO e os minerais e, (c) organo-mineral, interação entre a MO e óxidos de Fe e Al. As associações dificultam o acesso dos microrganismos a MO como fonte de substrato (EDWARDS & BREMNER, 1967; SPOSITO, 2008; BONNARD *et al.*, 2012; ZHANG *et al.*, 2016; ELLERBROCK & GERKE, 2018).

3.2.1 Cálcio

O cálcio é o metal alcalino-terroso mais abundante na crosta terrestre (WEDEPOHL, 1995). Solos ricos em cálcio demonstram uma correlação positiva entre Ca trocável e concentração de C-org do solo (PAUL *et al.* 2003; SHANG & TIESSEN, 2003; BERTRAND *et al.*, 2007; O'BRIEN *et al.*, 2015; LI *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2016).

O Ca pode interagir com o C-org por meio de processos de esfera interna (reações de troca de ligantes) e externa (troca de cátions), o que age contra a decomposição ou lixiviação do C-org do solo. O comportamento da esfera externa dos cátions está relacionado ao tamanho de sua camada de hidratação e valência. Por ser bivalente, as pontes trocáveis por Ca normalmente têm um tempo de residência maior do que os de cátions monovalentes. Os complexos de esfera interna ocorrem quando uma substância se aproxima da superfície de um mineral ou íon metálico, que geralmente resulta em quimissorção direta. Existem muitos

fatores que podem influenciar a complexação da esfera interna da MOS, como características dos cátions, quantidade e tipos de ligantes e características do ambiente (ESSINGTON, 2004; MINICK *et al.*, 2017; ROWLEY *et al.*, 2018).

A argila associada com os cátions polivalentes pode atuar como um material de cimentação que mantém as partículas unidas em agregados. Ambientes ricos em Ca são capazes de reprecipitar e formar cristais secundário de carbonato de cálcio (CaCO_3). A formação desses complexos entre o Ca e compostos orgânicos de alto peso molecular criam estruturas semelhantes a gel que diminuem a porosidade dos agregados e a acessibilidade do COS dentro dos microagregados aos decompositores (BALDOCK *et al.*, 2000; WUDDIVIRA & CAMPS-ROACH, 2007; ROWLEY *et al.*, 2018).

3.2.2 Silício

O Silício (Si) é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, aproximadamente 28% (Jackson, 1964). Os reservatórios de Si no solo podem ser subdivididos em reservatórios minerais e biogênicos, o qual pode ser encontrado principalmente nas frações solúvel, adsorvida e sólida, sendo a fração solúvel a forma mais disponível (SOMMER *et al.*, 2006; GOMES, SOUZA & FURTADO, 2018).

Há três principais grupos de compostos ricos em Si solúvel presente no solo: (i) compostos organo-silícicos, (ii) ácido monossilícico e (iii) ácido polisilícico. Os compostos organo-silicosos possuem um papel importante na formação da matéria orgânica no solo, podendo servir de catalisadores e reguladores na síntese de moléculas orgânicas. Porém, na solução do solo, o ácido monossilícico (H_4SiO_4) é o principal componente disponível e por não estar dissociado, encontra-se prontamente disponível para as plantas e vulnerável para possíveis perdas por lixiviação. (VISSOCKII & POLIAKOV, 1959; MEYER & KEEPING, 2001).

Devido seu amorfismo estrutural, o Si pode preencher ou adsorver intimamente o C-org em suas cavidades ou o adsorver frouxamente em suas superfícies externas, o que minimiza a exposição do COS a microrganismo e enzimas degradantes o que influencia a sua estabilidade. Outra forma indireta de proteção ao C-org oferecida pelo sílico é através de associações organo-minerais e agregados do solo onde podem ser adsorvidos por minerais e formar “pontes” de Si (MATUS *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2016; SONG *et al.*, 2017; SONG *et al.*, 2018).

A adição ao solo de materiais contendo Si aumenta a sua biodisponibilidade e favorece a produção vegetal e o acúmulo de fitólitos. Fitólitos são corpos de sílica hidratada amorfa

($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) gerados nas paredes celulares ou nos tecidos das plantas durante seus ciclos vegetativos que são incorporados ao solo após a decomposição da serapilheira. O acúmulo e a estabilização de Si fitogênico no solo dependem do retorno do Si através da serapilheira. Clarke (2003) constatou que fitólitos com mais C-org são mais estáveis e, Wickramasinghe e Rowell (2006) afirmaram que quando o solo tem menor teor de água e alta ou baixa relações de Si/Al e Si/Fe, o Si fitogênico tem menor solubilidade (BARTOLI E WILDING, 1980; BARTOLI, 1985; OSTERRIETH *et al.*, 2009; PIPERNO, 2016).

A presença de Si no solo está relacionada com aumento da resistência das culturas a estresses bióticos e abióticos, ao sequestro de C fitólito e proteção biogênica de Si. O C-org ocluído por fitólitos pode ser estável em solos por centenas ou milhares de anos (RODRIGUES *et al.*, 2011; PIPERNO, 2016; ZUO *et al.*, 2016, SONG *et al.*, 2018).

3.3 Atributos biológicos do solo

Os atributos biológicos do solo compreendem características sobre os organismos que formam a teia alimentar do solo, responsáveis pela decomposição da matéria orgânica e pelo ciclo de nutrientes. São importantes indicadores de alterações causadas por práticas agrícolas, pois podem apontar a capacidade de um solo de funcionar ou se recuperar após perturbações (resistência e resiliência) e são úteis para o monitoramento, orientação do planejamento e da avaliação das práticas de manejo (DORAN & PARKIN, 1996; FERREIRA *et al.*, 2017).

Os indicadores biológicos do solo fornecem informações sobre o componente vivo do solo e refletem a condição de sustentabilidade do ecossistema. São parâmetros considerados adequados para a avaliação da qualidade do solo do ponto de vista microbiológico do solo, pois refletem a manutenção dos organismos do solo e seu bom funcionamento como reguladores da ciclagem de nutrientes. Os microrganismos se enquadram como sensíveis bioindicadores da qualidade do solo, ao manejo da terra e, de distúrbios naturais e contaminantes químicos. São mais informativos sobre as funções dos solos e os processos do solo mediados por organismos (ARAÚJO & MONTEIRO, 2007).

Propriedades biológicas e bioquímicas como a respiração basal, atividade enzimática, biomassa microbiana, e carbono da biomassa microbiana são atributos utilizados para avaliar a dinâmica da matéria orgânica do solo. Esses atributos funcionam como indicadores sensíveis, o que possibilita sua utilização no monitoramento de prováveis modificações ambientais (DE OLIVEIRA SILVA *et al.*, 2021).

3.3.1 Biomassa microbiana

A biomassa microbiana é composta por bactérias, fungos, actinomicetos, protozoários e algas, e é um dos componentes que controla a decomposição e o acúmulo de matéria orgânica por atuar nos processos de mineralização e imobilização. Os microrganismos presentes na biomassa são considerados fonte ou dreno de nutrientes e desempenham funções essenciais que vão além da catalisação, decomposição e mineralização da matéria orgânica. Também atuam nos ciclos dos nutrientes como carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre (CUNHA, MENDES, GIONGO, 2015; BRANDANI, SANTOS, 2016; FIALHO *et al.*, 2020).

A biomassa microbiana representa, em média, 2 a 5% do C-org, e é o principal componente da matéria orgânica viva do solo. Junto ao carbono orgânico total e a respiração microbiana são indicadores de alterações de qualidade do solo, devido à sua relação com as funções ecológicas do ambiente e sua capacidade em refletir as mudanças no uso do solo (JENKINSON & LADD, 1981; HOFFMANN *et al.*, 2018).

Correlações positivas entre a matéria orgânica e a biomassa microbiana do solo (BMS) são evidenciadas em diversos estudos (BARGALI; PADALIA & BARGALI, 2019; WU *et al.*, 2019; TRENTIN, 2022; SOUZA *et al.*, 2022). Alterações significativas na biomassa microbiana podem ser detectadas com antecedência quando comparadas às mudanças na matéria orgânica (ROSCOE *et al.*, 2006). Assim, a biomassa microbiana tem sido proposta como um indicador do estado e das alterações da matéria orgânica do solo e sugerida como uma medida sensível do aumento, ou decréscimo, de sua quantidade (TOTOLA CHAER, 2002).

Essas avaliações fornecem informações rápidas sobre mudanças nas propriedades orgânicas do solo e revelam alterações causadas por cultivos ou por devastação de florestas. Possibilitam também mensurar a regeneração ou degradação dos solos após a retirada da camada superficial e avaliar os efeitos de substâncias potencialmente poluentes, como pesticidas e metais pesados. Isso possibilita adotar medidas de correção que evitem perdas da matéria orgânica, componente essencial para a fertilidade dos solos brasileiros (FRIGHETTO & VALARINI, 2000; DOS REIS JUNIOR & MENDES, 2007; ANDRADE *et al.*, 2020).

Quanto maior a biomassa microbiana, maior será a reserva de carbono do solo. Isso implica em imobilização temporária de nutrientes e expressa menor potencial de decomposição de matéria orgânica. O incremento dos resíduos de leguminosas de alta qualidade no solo implicará no aumento da matéria orgânica e, conseqüente, estímulo à BMS (MERCANTE *et al.*, 2008, SOUZA *et al.*, 2010).

3.3.2 Respiração Microbiana

A respiração basal do solo é definida como a soma de todas as funções metabólicas nas quais é produzido o CO₂. A liberação de CO₂ é proveniente da atividade de bactérias, fungos, algas, protozoários do solo e raízes de plantas (PRAGANA *et al.*, 2012; SILVA, 2020). A quantidade de CO₂ liberada pela respiração dos microrganismos, também denominada C prontamente mineralizável, é um dos métodos mais tradicionais e mais utilizados para avaliar a atividade metabólica da população microbiana do solo. Altas taxas de respiração podem significar distúrbios ecológicos ou alto nível de produtividade do ecossistema, (ISLAM & WEIL, 2000; DOS REIS JUNIOR & MENDES, 2007).

A respiração depende do estado fisiológico das células e é influenciada por diferentes fatores como a biomassa, cobertura vegetal, profundidade, manejo, sistema de cultivo e estação do ano. Uma alta taxa de respiração pode ser interpretada como uma característica desejável quando se considera que a decomposição dos resíduos orgânicos irá disponibilizar nutrientes para as plantas. No entanto, uma alta atividade respiratória também pode resultar em decomposição da matéria orgânica mais estável e levar ao comprometimento de processos químicos e físicos do solo, como a agregação, a capacidade de troca catiônica, e retenção de água, o que pode ocasionar a perda de nutrientes (DOS REIS JUNIOR & MENDES, 2007; DIAS *et al.*, 2010).

Em situações de equilíbrio ecológico ocorre menor perda de carbono na forma de CO₂ para atmosfera. A biomassa microbiana se torna mais eficiente na utilização de recursos do ecossistema e uma fração significativa de carbono é incorporada à biomassa microbiana (INSAM & DOMSCH, 1988; TOTOLA & CHAER, 2002).

3.3.3 Carbono orgânico do solo

O carbono é um dos principais elementos para os seres vivos e é o componente fundamental das moléculas orgânicas. A entrada de carbono orgânico no solo depende da presença de material vegetal e animal acima e abaixo do solo e suas respectivas taxas de decomposição. O clima, a textura e a estrutura do solo e as formas de manejo também controlam os níveis de carbono no solo, principalmente quando há a conversão de ecossistemas nativos em áreas agrícolas (ROSCOE & MACHADO, 2002; KIEHL, 2005; WIESMEIER, 2019). O C-org do solo tem importância para a fertilidade do solo, ciclagem de nutrientes, processos de adsorção, estrutura e estabilidade do solo (HARTEMINK *et al.*, 2014).

Embora represente uma pequena parte da fração mineral do solo, entre 0,5 a 5%, quando se refere a matéria orgânica do solo, ele compreende em média 58% de sua composição. Portanto, a fração de C-org no solo é muito superior ao carbono mineral, que é

encontrado na forma de carbonatos ou CO_2 (BRONICK & LAL, 2005; SILVA & MENDONCA, 2007).

O monitoramento do C-org do solo representa um importante parâmetro de avaliação da qualidade do mesmo, uma vez que está diretamente ligado a atividade metabólica dos microorganismos e responde rapidamente a ações antrópicas e alterações de manejo, o que o caracteriza como um indicador sensível e de fácil avaliação (SOUZA *et al.*, 2012; VIEIRA, 2019).

3.3.4 Quocientes metabólico e microbiano

Determinações da biomassa microbiana não fornecem indicações sobre os níveis de atividade das populações microbianas do solo, ou seja, podem ocorrer situações em que os solos apresentem elevadas quantidades de biomassa inativa e vice-versa. Daí a importância dos parâmetros que medem a atividade microbiana para avaliar o estado metabólico atual e potencial das comunidades de microrganismos do solo (ALMEIDA *et al.*, 2018).

O quociente metabólico ($q\text{CO}_2$) é um índice que expressa a taxa de respiração por unidade de biomassa microbiana (ANDERSON, DOMSCH, 1985). Quanto menor for o $q\text{CO}_2$ mais eficiente é a comunidade microbiana do solo em acumular C, o que sugere que a biomassa perderia menos C na forma de CO_2 com a respiração e, incorporaria mais C aos tecidos microbianos, demonstrando um maior estado de equilíbrio (BALOTA, 2017). Em amostras que apresentam os mesmos teores de biomassa, aquela que mostra uma menor taxa de respiração é considerada a mais eficiente. A relação da biomassa com a taxa de respiração permite avaliar a atividade microbiana, indicando o estado metabólico das comunidades de microrganismos do solo (DOS REIS JUNIOR & MENDES, 2007).

O uso do $q\text{CO}_2$ como indicador de mudanças na qualidade do solo está baseado na teoria da sucessão ecológica descrita por Odum (1969), na qual descreve que o aumento da respiração da comunidade pode representar perturbações no solo e requer mudanças de fluxo de energia do crescimento e reprodução para manutenção. Durante um estresse na biomassa microbiana haverá direcionamento de mais energia para a manutenção celular do que para o crescimento, de forma que uma proporção de carbono da biomassa será perdida como gás carbônico.

Quanto menos contaminantes o solo tiver e mais disponível for o carbono do substrato, menos energia a microbiota terá que consumir para incorporar carbono a sua biomassa. Por esse motivo, o $q\text{CO}_2$ tem sido utilizado como indicador de ambientes com algum tipo de

distúrbio ou estresse e também para estimar a qualidade de substratos (ANDERSON & DOMSCH, 1993; TOTOLA & CHAER, 2002; VIEIRA, 2019)

Já o quociente microbiano (qMic) é um índice utilizado para fornecer indicações sobre a qualidade da matéria orgânica, expressado pela relação entre o C da biomassa microbiana e o C orgânico total. Em condições estressantes para os microrganismos (pH, deficiências nutricionais, metais pesados, etc.), a capacidade de utilização do C é menor, o que leva ao decréscimo do qMic. Já com a adição de matéria orgânica de boa qualidade, ou com o término de uma situação de estresse, ocorre um incremento na biomassa microbiana, em relação à quantidade de carbono orgânico disponível, o que promove maior eficiência no seu uso pelos microrganismos (POWLSON *et al.*, 1987; DOS REIS JUNIOR & MENDES, 2007; SILVA *et al.*, 2010; DE OLIVEIRA SILVA *et al.*, 2021).

3.4 Eficiência do uso do Carbono

Após a matéria orgânica entrar no solo, ela passa por uma série de transformações químicas e físicas que juntas, contribuem para sua formação e persistência. Durante essas transformações, a maior parte da entrada de carbono no solo é mineralizado para CO₂ com uma eficiência de formação da MOS. Lavallee *et al.* (2018) definiram esse processo como a quantidade de C derivado do insumo recuperado no solo versus a quantidade de C perdida durante a decomposição de tal insumo, que representa a eficiência do uso do carbono microbiano (EUC).

A eficiência do uso do carbono é uma representação sintética do metabolismo decompositor de C, que define como os decompositores equilibram as reações anabólicas e catabólicas. De forma mais clara, a eficiência do uso do carbono é definida como a fração de assimilação microbiana que é alocada para processos biossintéticos (por exemplo, crescimento), com o restante respirado (STEINWEG *et al.*, 2008; MANZONI *et al.*, 2012). Assim, mais biomassa microbiana e menos respiração resulta em maior EUC, porque mais do substrato assimilado permanece nas células em vez de ser respirado, o que gera possível estabilização do C nos solos (MANZONI *et al.*, 2012; ALLISON, 2014).

A eficiência do uso do carbono pode ser diretamente afetada por mudanças climáticas e mudanças na umidade do solo, devido a modificações nos regimes de precipitação (MANZONI *et al.*, 2012). Segundo Liu *et al.* (2010) o quociente metabólico do solo diminui com o aumento da precipitação anual, ou seja, o EUC microbiano aumenta com a aumento da umidade do solo. Diante disso, entender os impulsionadores da EUC é essencial para determinar o destino do C no solo.

3.5 Nitrogênio

O nitrogênio é um elemento importante na ciclagem da matéria orgânica do solo. É um nutriente de baixa disponibilidade nos solos, fator esse limitante nos processos e produtividade biológica (ROS *et al.*, 2011). A disponibilidade bioquímica de N, tanto em suas formas orgânicas quanto inorgânicas, determina a quantidade de C imobilizado na biomassa viva e na serapilheira que são as fontes para o reservatório da MOS. Além disso, estudos indicam que a disponibilidade N para microrganismos afeta o padrão de degradação e as taxas de renovação dos diferentes reservatórios de C orgânico do solo (VITOUSEK & HOWARTH, 1991; KNICKER, 2011; TANG, 2023).

A acessibilidade de nitrogênio afeta quase todos os componentes do ecossistema por criar interações complexas que afetam o MOS por meio de vários mecanismos. Alguns modelos que descrevem a dinâmica do C e N no solo distinguem entre o ciclo do N e do C, o que mostra a interação dos dois ciclos, mas considera que eles atuam de forma independente (KNICKER, 2011; LAVALLEE *et al.*, 2020). Knicker (2011) considera que os compostos que formam N orgânico também contribuem para a fração de C orgânico. Esta associação entre o C e N implica que os mecanismos que afetam a estabilização do N devem ter um impacto considerável no tamanho e na qualidade dos diferentes reservatórios de C orgânicos.

As adições de nitrogênio podem deslocar a estequiometria dos insumos para mais perto de atender à demanda microbiana de N, e compostos inorgânicos de N podem ser facilmente reciclados para a formação de nova biomassa, a qual está associada a uma imobilização de carbono orgânico. Isso poderia mudar a formação de matéria orgânica no solo da fração particulada para a fração associada aos minerais (COTRUFO *et al.*, 2013).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLISON, S. D. Adaptação de modelagem da eficiência do uso de carbono em comunidades microbianas. **Fronteiras em Microbiologia**, v. 5, p. 571, 2014.
- ALMEIDA, L. F. J.; HURTARTE, L. C. C.; SOUZA, I. F.; SOARES, E. M. B.; VERGÜTZ, L.; SILVA, I. R. Formação de matéria orgânica do solo afetada pela bioquímica da serapilheira de eucalipto - evidências de um estudo de incubação. **Geoderma** 312:121–129, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.004>
- ANDERSON, J. P. E.; DOMSH, K. H. The metabolic quotient (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environment conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biol. Biochem.**, Oxford, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. Determinação das exigências ecofisiológicas de carbono para manutenção de microrganismos do solo em estado dormente. **Biologia e Fertilidade dos Solos**, v. 1, p. 81-89, 1985.
- ANDRADE, V. S.; VIEIRA, E. S.; PINHEIRO, S. S. C.; PERIN, L.; MENEZES, V. M. M. Respiração e biomassa microbiana em área de cultivo de cana-de-açúcar. **Cadernos de Agroecologia**, v. 15, n. 10, 2020.
- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 3, 2007.
- BALDOCK, J. A.; SKJEMSTAD, J. O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. **Organic Geochemistry**, v.31, p.697–710, 2000.
- BALOTA, E. L. Manejo e qualidade biológica do solo. 1. ed. Londrina: Mecenas, 2017. 288p.
- BARGALI, S. S.; PADALIA, K. & BARGALI, K. Efeitos do cultivo de árvores na saúde do solo e na biomassa microbiana sob diferentes sistemas de uso da terra no Himalaia Central. **Degradação e Desenvolvimento da Terra**, v. 30, n. 16, pág. 1984-1998, 2019.
- BARTOLI, F., Cristaloquímica e propriedades de superfície da opala biogênica. *J. Soil Sci.* 36, 335–350, 1985.
- BARTOLI, F.; WILDING, L. P. Dissolução da opala biogênica em função de suas características físicas e propriedades químicas. *Ciência do Solo Sociedade Sou.* 44, 873-878, 1980.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO_2 . **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.599-607, 2000.
- BERTRAND, I.; DELFOSSE, O.; MARY, B. Carbono e nitrogênio mineralização em solos agrícolas ácidos, calcários e calcários: efeitos aparentes e reais. **Soil Biol Biochem**, 39(1):276–288, 2007.
- BONNARD, P.; BASILE-DOELSCH, I.; BALESSENT, J.; MASION, A.; BORSCHNECK, D.; ARROUAYS, D. (2012): Teor de matéria orgânica e características relacionadas às frações minerais associadas em um solo argiloso e ácido. *EUR. J. Soil Sci.* 63, 625–636.
- BRANDANI, C. B.; SANTOS, D. G. Transformações do carbono no solo. In: ANDREOTE, F. D.; CARDOSO, E. J. B. N. **Microbiologia do solo**, 2 ed. p. 221, 2016.

- BRONICK, C. J., & LAL, R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22, 2005.
- CALICIOGLU, O. *et al.* The future challenges of food and agriculture: An integrated analysis of trends and solutions. *Sustainability*, v. 11, n. 1, p. 222, 2019.
- CAMBARDELLA, C. A., & ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil science society of America journal*, 56(3), 777-783, 1992.
- CLARKE, J. The occurrence and significance of biogenic opal in the regolith. *Earth-Sci. Rev.* 60, 175–194, 2003.
- COSTA, E.; SILVA, H.; RIBEIRO, P. R. Matéria orgânica do solo e o seu papel na manutenção e produtividade dos sistemas agrícolas. *Enciclopédia biosfera*, v. 9, n. 17, 2013.
- COTRUFO, M. F., WALLENSTEIN, M. D., BOOT, C. M., DENEFF, K. & PAUL, E. 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, 2013.
- CUNHA, T. J. F.; MENDES, A. M. S.; GIONGO, V. *Matéria orgânica do solo*. 2015.
- DE OLIVEIRA SILVA, M. *et al.* Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 1, p. 6853-6875, 2021.
- DIAS, A. T. C.; RUIJVEN, J. V.; BERENDSE, F. Plant species richness regulates soil respiration through changes in productivity. *O ecologia*, v. 163, n. 3, p. 805-813, 2010.
- DORAN, J. W., & SAFLEY, M. Defining and assessing soil health and sustainable productivity. *Biological indicators of soil health*, 1-28, 1997.
- DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. 1996. **Indicadores quantitativos de qualidade do solo: um conjunto mínimo de dados**. Em JW Doran e AJ Jones, eds. Métodos de avaliação da qualidade do solo. SSSA, Inc., Madison, Wisconsin, EUA.
- DOS REIS JUNIOR, F. B.; MENDES, I. de C. **Biomassa microbiana do solo**. 2007.
- EDWARDS, A. P.; BREMNER, J. M. Microaggregates in solo 1. *Journal of Soil Science*, v. 18, n. 1, p. 64-73, 1967.
- ELLERBROCK, R. H.; GERKE, H. H. Explaining soil organic matter composition based on associations between OM and polyvalent cations. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 181, n. 5, p. 721-736, 2018.
- ESSINGTON, M. E. Soil and water chemistry. An intergrative approach. CRC Press, Boca Raton, 2004.
- FAO. The Future of Food and Agriculture: Trends and Challenges; **FAO**: Rome, Italy, 2017; ISBN 9789251095515.
- FERREIRA, E. P. B.; STONE, L. F.; MARTIN-DIDONET, C. C. G. População e atividade microbiana do solo em sistema agroecológico de produção. *Rev. Ciênc. Agron.*, v.48, p.22-31, 2017.
- FIALHO, C. M. T.; SILVA, A. A.; MELO, C. A. D.; COSTA, M. D.; SOUZA, M. W. R.; REIS, L. A. C. Weed Interference in Soybean Crop Affects Soil Microbial Activity and

Biomass. **Planta Daninha**, v. 38, p. 1-6, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-83582020380100046>.

FRIGHETTO, R. T. S. & VALARINI, P. J. **Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo: manual técnico**, 26(11), 1469-1475, 2000.

GOMES, L. S.; SOUZA, M. C.; FURTADO, A. C. R. A sílica e suas particularidades. **Revista virtual de química**, v. 10, n. 4, 2018.

HARTEMINK, A. E.; GERZABEK, M. H.; LAL, R.; MCSWEENEY, K. Soil carbon research priorities. In: **Soil carbon**. Springer, Cham, 2014. p. 483-490.

HOFFMANN, R. B.; MOREIRA, É. E. A.; HOFFMANN, G. S. S.; ARAÚJO, N. S. F. Efeito do manejo do solo no carbono da biomassa microbiana. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 1, n. 1, p. 168-178, 2018.

HUPPMANN, D.; ROGELJ, J.; KRIEGLER, E.; KREY, V. & RIAHI, K. A new scenario resource for integrated 1.5°C research. **Nature Climate Change**, 8(12), 1027–1030, 2018.

INSAM, H.; DOMSCH, K. H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chrono sequences of reclamation sites. **Microbial Ecology**, New York, v.15, p.177-188, 1988.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. **Efeitos do uso da terra na qualidade do solo em um ecossistema de floresta tropical de Bangladesh**. *Ecosistemas Agrícolas e Meio Ambiente*, v. 79, p. 9-16, 2000.

JACKSON, M. L. Chemical composition of soils. p. 71-141. In F. E. Bear (ed.) *Chemistry of the soil*. Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1964.

JENKINSON, D. S.; LADD, J.N. Biomassa microbiana no solo: medição e rotatividade. **Bioquímica do solo**, v. 5, n. 1, pág. 415-471, 1981.

KHORRAMDEL, S.; KOOCHEKI, A.; MAHALLATI, M.N.; KHORASANI, R.; GHORBANI, R. **Evaluation of carbon sequestration potential in corn fields with different management systems**. *Soil & Tillage Research*, v.133, p.25-31, 2013.

KIEHL, E. J. **Adubação orgânica: 500 perguntas e respostas**. Piracicaba: Edmar José Kiehl, 227p, 2005.

KNICKER, H. Soil organic N-Anunder-rated player for C sequestration in soils? *Soil Biol. Bioch.*, **Elsevier**, Amsterdam, v. 43, n. 6, p. 1118-1129, 2011.

LAL, R. Soil carbon sequestration impactos on global. **Science**, v. 304, p 1623, 2004.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceituando a matéria orgânica do solo em formas particuladas e associadas a minerais para abordar a mudança global no século XXI. **Biologia da mudança global**, v. 26, n. 1, pág. 261-273, 2020.

LAVALLEE, J. M.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; COTRUFO, M. F. Incorporação de 13 C e 15 N derivados da parte aérea versus 15 N em frações de matéria orgânica associada a minerais: resultados de uma incubação de pasta de solo com material vegetal duplamente marcado. **Biogeochemistry**, v. 137, p. 379-393, 2018.

LEHMANN, J. & KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. **Nature** 528, 60–68, 2015.

- Li, D.; Wen, L.; Yang, L.; Luo, P.; Xiao, K.; Chen, H.; Zhang, W.; He, X.; Chen, H.; Wang, K. Dynamics of soil organic carbon and nitrogen following agricultural abandonment in a karst region. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 122, n. 1, p. 230-242, 2017.
- LIU, X. B.; HAN, X. Z.; HERBERT, S. J.; XING, B. Dynamics of soil organic carbon under different agricultural management system in the black soil of China. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.34, p.973-984, 2003.
- LIU, Z.; FU, B.; ZHENG, X.; LIU, G. Biomassa vegetal, teor de água no solo e razão N:P do solo regulando a diversidade funcional microbiana do solo em uma estepe temperada: um estudo em escala regional. **Soil Biol Biochem** 42(3):445–450, 2010.
- LUO, X.; HOU, E.; ZHANG, L. & WEN, D. Dinâmica do carbono no solo em diferentes tipos de florestas subtropicais determinada por fracionamento de densidade e análise de isótopos estáveis. **Forest Ecology and Management**, 475, 18401, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118401>
- MANZONI, S.; TAYLOR, P.; RICHTER, A.; PORPORATO, A. & ÅGREN, G. I. (2012). **Controles ambientais e estequiométricos na eficiência microbiana do uso de carbono em solos**. *Novo Fitol.* 196, 79–91. doi: 10.1111/j.1469-8137.2012.04225.x
- MATUS, F. *et al.* Soil carbon storage and stabilisation in andic soils: A review. **Catena**, v. 120, p. 102–110, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.008>>.
- MERCANTE, F. M.; SILVA, R. F.; FRANCELINO, C. S. F.; CAVALHEIRO, J. C. T.; OTSUBO, A. A. Biomassa microbiana em um Argissolo Vermelho, em diferentes coberturas vegetais, em área cultivada com mandioca. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 4, p. 479-485, 2008.
- MEYER, J. H.; KEEPING, M. G. Past, present and future research of the role of silicon for sugarcane in southern Africa. In: **Studies in plant science**. Elsevier, 2001. p. 257-275.
- MINICK, K. J.; FISK, M. C.; GROFFMAN, P. M. Soil Ca altera os processos que contribuem para a retenção de C e N no horizonte Oa/A de uma floresta de folhosas do Norte. **Biogeoquímica** 132:343–357, 2017.
- MOURA, E. G. **Entre a Agricultura e a Ecologia, uma interface por onde transita a emancipação dos agricultores do trópico úmido**. São Luís: UEMA, cap. 6 e 7, p. 63-97, 2020.
- NELSON, P. N., BALDOCK, J.A. Soil Organic Matter and P.N. Hardsetting soils. In: Summer M. E., (ed) **Handbook of soil science**. CRC Press, New York, pp B25–B71, 1999.
- O'BRIEN, S. L.; JASTROW, J. D.; GRIMLEY, D. A.; GONZALEZ-MELER, M. A. Controles edáficos nos estoques de carbono orgânico do solo em pastagens restauradas. **Geoderma** 251–252:117–123, 2015.
- ODUM, E. P. A Estratégia de Desenvolvimento do Ecossistema: Uma compreensão da sucessão ecológica fornece uma base para resolver o conflito do homem com a natureza. **ciência**, v. 164, n. 3877, pág. 262-270, 1969.
- OSTERRIETH, M. L.; MADELLA, M.; ZURRO, D.; ALVAREZ, M. F. Taphonomical aspects of silica phytoliths in the loess sediments of the Argentinean Pampas. **Quaternary International**, v.193, p. 70-79, 2009.

PAUL, E. A.; MORRIS, S. J.; SIX, J.; PAUSTIAN, K.; GREGORICH, E. G. Interpretação da dinâmica do carbono e nitrogênio do solo em solos agrícolas e florestais. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 5, pág. 1620-1628, 2003.

PIPERNO, D. R. Phytolith radiocarbon dating in archaeological and paleoecological research: a case study of phytoliths from modern Neotropical plants and a review of the previous dating evidence. **Journal of Archaeological Science**, v. 68, p. 54–61, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2015.06.002>>.

POWLSON, D. S., BROOKES, P. C.; CHRISTENSEN, B. T. A medição da biomassa microbiana do solo fornece uma indicação precoce das mudanças na matéria orgânica total devido à incorporação da palha. **Biologia e Bioquímica do Solo**, v. 19, p. 159-164, 1987.

PRAGANA, R. B.; NOBREGA, R. S. A.; RIBEIRO, M. R.; LUSTOSA FILHO, J. F. Atributos biológicos e dinâmica da matéria orgânica em latossolos amarelos na região do cerrado piauiense sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36:851- 858, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000300015

QUESADA, C. A.; PAZ, C.; OBLITAS, E. M.; PHILLIPS, O. L.; SAIZ, G.; LLOYD, J. **Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations** *Soil*, v. 6, p. 53–88, 2020. <https://doi.org/10.5194/soil-6-53-2020>.

RODRIGUES, F. A.; OLIVEIRA, L. A.; KORNDORFER, A. P.; KORNDORFER, G. H. Silício: Um elemento benéfico e importante para as plantas. **Informações Agronômicas**. 2011; 134:14-20.

ROS, G. H. *et al.* Prevendo a mineralização de N do solo: Relevância das frações de matéria orgânica e propriedades do solo. **Biologia e Bioquímica do Solo**, v. 43, n. 8, pág. 1714-1722, 2011.

ROSCOE, R., BODDEY, R. M., SALTON, J. C. **Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo**. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F. B., SALTON, J. C. (Orgs.). *Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares*. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. p. 17-42.

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

ROWLEY, M. C.; GRAND, S.; VERRECCHIA, É. P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. **Biogeochemistry**, v. 137, n. 1-2, p. 27-49, 2018.

SALTON, J. C.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. **Contents and dynamics of soil carbon in integrated crop-livestock systems**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.46, n.10, p.1349- 1356, 2011.

SHANG, C.; TIESSEN, H. Sequestro orgânico de C no solo e estabilização em solos cársticos de Yucatán. **Biogeoquímica** 62(2):177–196, 2003.

SILVA, E. F. **Indicadores bioquímicos, biológicos e carbono das frações orgânicas em latossolos tratados com lodo de esgoto em experimento de longa duração**. UNESP. Jaboticabal, 2020.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; V. ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C.

- L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. VI, p. 275-374.
- SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S. Matéria orgânica do solo. In: VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. (Ed.). **Biologia dos solos dos Cerrados**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1997. cap. 9, p. 465-524.
- SILVA, R. R. D; SILVA, M. L. N; CARDOSO, E. L; MOREIRA, F. M. D. S; CURI, N; ALIVISI, A. M. T. **Biomassa e atividade microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica campos das vertentes - MG**. Rev. Bras. Ciên. Solo, Viçosa – MG, v. 34, p. 1585-1592, 2010.
- SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B. A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, v. 74, n. 1-2, p. 65-105, 1996.
- SOMMER, M.; KACZOREK, D.; KUZYAKOV, Y. & BREUER, J. Piscinas e fluxos de silício, solos e paisagens - uma revisão. *Jornal de Nutrição de Plantas e Ciência do Solo*. 2006; 169:310-329.
- SONG, Y. *et al.* Soil Biology & Biochemistry Altered soil carbon and nitrogen cycles due to the freeze-thaw effect: A meta-analysis. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 109, p. 35–49, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.01.020>.
- SONG, Z.; LIU, C.; MÜLLER, K.; YANG, X.; WU, Y. & WANG, H. Silicon regulation of soil organic carbon stabilization and its potential to mitigate climate change. **Earth-Science Reviews**, v. 185, p. 463-475, 2018.
- SOUZA, E. D. *et al.* Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidade de pastejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 1, p. 79-88, 2010.
- SOUZA, P. T. D.; SILVA, T. C.; TROLEIS, M. J. B.; SENA, K. N.; SILVA, A. C. R.; SANTOS, T. E. B. D. & MONTANARI, R. Variabilidade espacial da biomassa e atividade microbiana do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 1949-1967, 2022.
- SOUZA, R. A., TELLES, T. S., MACHADO, W., HUNGRIA, M., TAVARES FILHO, J., & DE FATIMA GUIMARAES, M. (2012). Effects of sugarcane harvesting with burning on the chemical and microbiological properties of the soil. **Agriculture, ecosystems & environment**, 155, 1-6.
- SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. Oxford university press, 2008.
- STEINWEG, J. M.; PLANTE, A. F.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A. & TANAKA, D. L. Padrões de utilização do substrato durante incubações de longo prazo em diferentes temperaturas. *Bio do Solo*. **Bioquímica**. 40, 2722-2728, 2008. doi: 10.1016/j.soilbio.2008.07.002
- TANG, B., ROCCI, K.S, LEHMANN, A., & RILLIG, M.C. O nitrogênio aumenta o acúmulo de carbono orgânico no solo e altera sua funcionalidade. **Biologia da Mudança Global**, 2023.
- TARNOCAI, C.; CANADELL, J.G.; SCHUUR, E.A.G.; KUHRY, P.; MAZHITOVA, G.; ZIMOV, S. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 23, n. 2, 2009.

TIPPING, E. **Cation Binding by Humic Substance**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2005.

TOTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In ALVAREZ, V H., SCHAEFER, C. E. GR., BARROS, N. F MELLO, J. W. V., COSTA, L M. (Ed.). Tópicos em ciência do solo Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2002 v. 2, p 195-276.

TRENTIN, M. **Frações da matéria orgânica e carbono da biomassa microbiana como indicadores de qualidade do solo em diferentes sistemas de cultivo**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

VIEIRA FILHO, J. E. R. O., VIEIRA, A. C. P., RIGHETTO, A. J., FREITAS, C. O. D., OLIVEIRA, D. V. D., COSTA, E. M., ... & OLIVEIRA, W. M. D. Diagnóstico e desafios da agricultura brasileira. **IPEA**, Rio de Janeiro, 2019.

VIEIRA, B. A. R. M. **Atributos microbianos do solo sob cultivo de cana-de-açúcar com diferentes níveis de palha**. 2019. Tese de doutorado. Instituto agrônomo.

VISSOCKII, Z. Z.; POLIAKOV, V. M. The change of pore structure of silica-gel under the form created substances in steam forms. *Doklady Academic Science, Moscow, URSS*, v. 129, p. 831-834, 1959.

VITOUSEK, P. & HOWARTH, R. Limitação de nitrogênio em terra e no mar: como pode ocorrer? **Biogeochemistry**, 13, 87 – 115, 1991.

Von LÜTZOW, M. *et al.* Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review. **European journal of soil science**, v. 57, n. 4, p. 426-445, 2006.

WALTHALL, C. L.; HATFIELD, J.; BACKLUND, P. **Climate change and agriculture in the United States: effects and adaptation**. USDA Technical Bulletin 1935. Washington, DC. p. 186, 2012.

WEDEPOHL, K. H. A composição da crosta continental. **Geochimica et cosmochimica Acta**, v. 59, n. 7, pág. 1217-1232, 1995.

WICKRAMASINGHE, D. B.; ROWELL, D. L. A liberação de silício da sílica amorfa e palha de arroz em solos do Sri Lanka. *Biol. Fertil. Solos* 42, 231–240, 2006.

WIESMEIER, M.; URBANSKI, L.; HOBLEY, E.; LANG, B.; VON LÜTZOW, M.; MARIN-SPIOTTA, E.; ... & KÖGEL-KNABNER, I. Armazenamento de carbono orgânico no solo como uma função chave dos solos - Uma revisão de drivers e indicadores em várias escalas. **Geoderma**, v. 333, pág. 149-162, 2019.

WORLD BANK GROUP. Global Monitoring Report 2015/2016: Development Goals in an Era of Demographic Change; **World Bank**: Washington, DC, USA, 2016.

WU, L.; ZHANG, W.; WEI, W.; HE, Z.; KUZYAKOV, Y.; BOL, R. & HU, R. A preparação da matéria orgânica do solo e o balanço de carbono após a adição de palha são regulados por fertilização de longo prazo. **Biologia e Bioquímica do Solo**, v. 135, p. 383-391, 2019.

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

YANG, S.; CAMMERAAT, E.; JANSEN, B.; CERLI, C.; KALBITZ, K. Estabilização de carbono orgânico de solos formados em leitos rochosos ácidos e calcários em campos alpinos neotropicais, Peru. In: **Resumos da Conferência da Assembleia Geral da EGU**. 2016. pág. EPSC2016-646.

ZHANG, X. D.; SONG, Z. L.; MCGROUTHER, K.; LI, J.W.; LI, Z.M.; RU, N.; WANG, H. L. The impact of different forest types on phytolith-occluded carbon accumulation in subtropical forest soils. *J. Soil Sediment.* 16, 461–466, 2016.

ZHANG, Y.; LI, M.; WU, S.; ZHANG, Q. **Pesquisa sobre hidrofiliçidade e hidrofobicidade da adsorção de NOM na interface óxido metálico/água**. *Desalin. e Tratamento de Água*.57, 1940–1948, 2016.

ZUO, X. *et al.* Radiocarbon dating of prehistoric phytoliths: a preliminary study of archaeological sites in China. **Nature Publishing Group**, n. March, p. 1–7, 2016.

CAPÍTULO II

ABORDAGEM ECO FISIOLÓGICA PARA AVALIAR A EVOLUÇÃO DO CARBONO NO SOLO

1 INTRODUÇÃO

O manejo inadequado e intensivo do solo por meio das atividades agrícolas pode trazer consequências negativas, como esgotamento da matéria orgânica, nutrientes e decréscimo da atividade de microrganismos, o que resulta em perda da fertilidade do solo, pois os microrganismos desempenham importantes funções nos processos de ciclagem de nutrientes. Com isso, para que a conservação e a sustentabilidade dos agroecossistemas sejam mantidas, a qualidade do solo adquiriu uma dimensão importante relacionada às estratégias de manejo adequado (DUARTE *et al.*, 2014; DE OLIVEIRA SILVA *et al.*, 2021).

Nas regiões tropicais e subtropicais, o principal impacto da atividade agrícola nos solos é a perda do conteúdo de carbono orgânico, fato esse que afeta diretamente a capacidade produtiva do solo. Uma das práticas capazes de promover a sustentabilidade agrícola é a adubação verde, que consiste no cultivo, corte e deposição de plantas como cobertura do solo (MOURA, 2020; KASSAM *et al.*, 2021; UTIN, 2023).

O uso de biomassa de alta qualidade, caracterizado pela baixa relação C/N (< 25), serve como fonte de nutrientes para os microrganismos, contribui na manutenção da umidade, ajuda a manter temperatura mais baixa e a diminuir a evapotranspiração do solo. É considerada uma alternativa ecológica e econômica que possibilita o aumento no teor de matéria orgânica e do carbono orgânico que consequentemente reflete no equilíbrio das propriedades físicas, químicas e biológicas, que regulam o sistema solo-planta (SANTOS, *et al.*, 2008; GIONGO *et al.*, 2011; TSONKONVA *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2014; WUTKE *et al.*, 2014; BRITO *et al.*, 2017; KADER *et al.*, 2019).

Sob este ponto de vista, o comportamento da matéria orgânica do solo poderia ser utilizado como parâmetro para determinar a qualidade dos solos, porém, são necessários muitos anos até que alterações significativas sejam percebidas. Com isso, tem sido dada atenção aos parâmetros biológicos do solo, como o carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal do solo (RBS), quociente metabólico e quociente microbiano. A avaliação desses parâmetros fornece informações mais rápidas sobre mudanças nas propriedades orgânicas do solo e as alterações causadas por cultivos ou por devastação de florestas o que possibilita a adoção de medidas de correção mais eficientes (DOS REIS JUNIOR & MENDES, 2007; ANDRADE *et al.*, 2020; DE OLIVEIRA SILVA, 2021).

A biomassa microbiana é a principal responsável pela decomposição dos resíduos orgânicos e pela ciclagem de nutrientes, por estar associada às funções ecológicas do ambiente. Além disso, é capaz de refletir rapidamente as mudanças de uso do solo. Todavia, a

determinação da biomassa microbiana não fornece indicações sobre os níveis de atividade das populações microbianas do solo. Neste sentido, o uso dos quocientes é indicado para avaliar o efeito das condições ambientais sobre a atividade microbiana e a qualidade da matéria orgânica (JACKSON *et al.*, 2003; DE OLIVEIRA SILVA, 2021).

Outras práticas capazes de promover a sustentabilidade em solos agrícolas, através do aumento da estabilidade da matéria orgânica, é elevar a disponibilidade de nitrogênio e o teor de cátions polivalentes, como Ca^{2+} e Si^{2+} , no solo. O incremento de nitrogênio geralmente traz efeitos benéficos na taxa de assimilação de carbono e, ademais, a disponibilidade de N para os microrganismos afeta o padrão de degradação e as taxas de renovação dos diferentes reservatórios de C-org do solo (VITOUSEK & HOWARTH, 1991; CORREIA *et al.*, 2005; KNICKER, 2011; TANG *et al.*, 2023).

Quando os microrganismos do solo morrem, parte dos resíduos microbianos (necromassa/matéria orgânica morta) são reciclados como substrato para o crescimento microbiano ou estabilizados por adsorção às superfícies minerais e proteção dentro dos microagregados (LIANG *et al.*, 2019; BUCKERIDGE *et al.*, 2020). As interações das esferas interna (troca de ligantes) e externa (troca de cátions) dos cátions atuam em combinação nesse processo de adsorção e proteção, o que reduz a exposição do COS a microrganismos e enzimas degradantes. A presença Ca^{2+} também foi relacionada a diminuição da taxa de respiração por unidade de carbono em experimentos de incubação (SOLLINS *et al.*, 1996; WHITTINGHILL & HOBBIE, 2012; MINICK *et al.*, 2017).

Embora alguns avanços tenham sido obtidos, ainda se faz necessário o desenvolvimento de pesquisas que possam fornecer maior suporte, a fim de obter um direcionamento a respeito de estratégias de manejo do solo que possibilitem preservar sua qualidade. Com isso, esse estudo teve como objetivo avaliar o efeito da interação entre a biomassa de alta qualidade com os cátions polivalentes Ca e Si sob os quocientes biológicos e como esse efeito interfere no acúmulo da fração estável da matéria orgânica do solo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área

O experimento foi conduzido na Universidade Estadual do Maranhão, na área experimental do campus de São Luís (2° 31' 51" S, 44° 18' 24" W) durante o período de outubro de 2021 a março de 2023. Segundo a classificação de Köppen, a região possui clima equatorial quente e semiúmido com duas estações bem definidas, uma estação chuvosa que se estende de janeiro a junho e, uma estação seca com déficit hídrico acentuado de julho a dezembro. A

temperatura média anual é de aproximadamente 27 °C. A precipitação média anual (mm) durante o período experimental foi de 2851.4 mm (CPTEC, 2023). A Figura 1 apresenta os dados trimestrais da precipitação no período de condução do estudo.

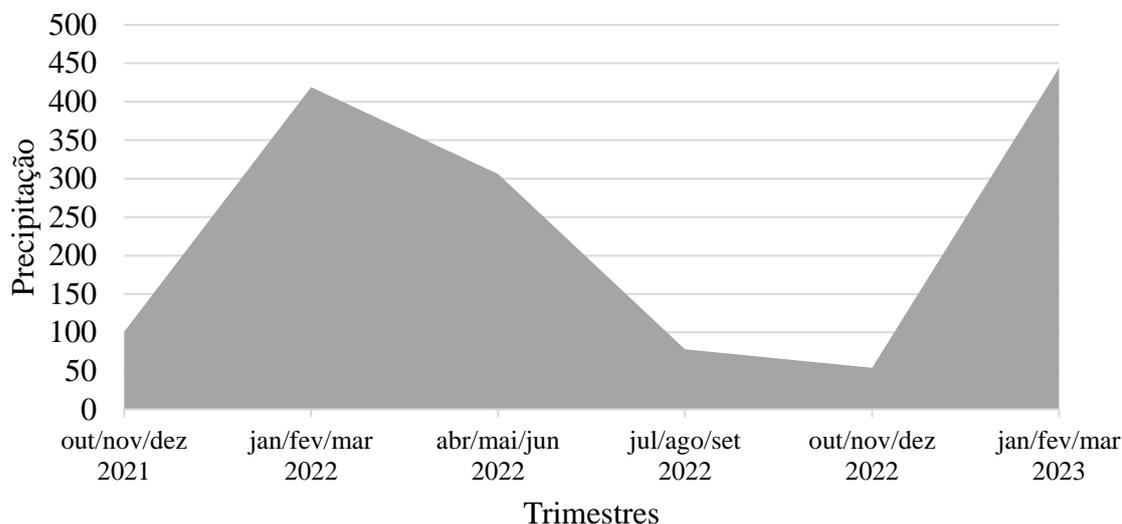


Figura 1 - Precipitação trimestral do período de condução do experimento. São Luís, MA. 2023.

O solo da região apresenta características coesivas (GIAROLA & DA SILVA, 2002; MOURA *et al.* 2012) e foi classificado como Arenic Hapludults (SOIL SURVEY STAFF, 2014). As propriedades químicas e físicas do solo estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades químicas e físicas do solo utilizado no experimento na profundidade de 0-10 cm.

pH (CaCl ₂)	P mg dm ⁻³	Al + H mmol dm ⁻³	Ca	Mg	K	CTC	ST	C-org	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
							%		g kg ⁻¹			
4,0	15	25	15	9	1	50	50	20	300	545	61	90

ST: saturação de base percentual, CTC: capacidade troca de cátions. C-org: carbono orgânico

Anteriormente a este estudo, a área foi utilizada em outros experimentos, todos relacionados a estabilização da matéria orgânica e baseados no cultivo de leguminosas e milho, com aplicação de cálcio e ureia ao solo. Em janeiro de 2011, a área foi corrigida com 1 t ha⁻¹ de cal superficial, correspondendo a 390 kg ha⁻¹ de Ca e 130 kg ha⁻¹ de Mg. Foram aplicadas 6 t ha⁻¹ de gesso natural nas parcelas pré-determinadas, o que corresponde a 1,002 kg ha⁻¹ de Ca. Em janeiro de 2016, 4 t ha⁻¹ de gesso e 1 t ha⁻¹ de cal foram reaplicados, o que corresponde a 390 kg ha⁻¹ de Ca e 130 kg ha⁻¹ de Mg para aplicação de cal e, 680 kg ha⁻¹ de Ca para aplicação de gesso. A área experimental estava em pousio desde 1990 e continha uma espécie nativa de grama, que foi removida com aplicação de glifosato, e as ervas daninhas restantes foram removidas manualmente.

2.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso (DBC), com oito tratamentos e quatro repetições. As parcelas mediam 32 m², totalizando 1.024 m² de área útil. Os tratamentos estudados foram: 1) U (ureia); 2) L (leguminosas); 3) L + U (leguminosas + ureia); 4) Ca + L (cálcio + leguminosas); 5) Si + L (silício + leguminosas); 6) Ca + L + U (cálcio + leguminosas + ureia); 7) Si + L + U (silício + leguminosas + ureia) e; 8) Ca + Si + L + U (cálcio + silício + leguminosas + ureia). As leguminosas utilizadas como fonte de biomassa foram: estiliosante var. Campo Grande (*Stylosanthes capita* e *Stylosanthes macrocephala*), gliricídia (*Gliricidia sepium*) e leucena (*Leucaena leucocephala*), conhecidas pela alta qualidade de resíduos e com relação C/N 13,51 para gliricídia, 11,48 para leucena e de 10,6 para estiliosante.

Nos ciclos experimentais (Tab. 2) as sementes de estiliosantes foram plantadas após aplicações dos cátions. Em cada parcela foram estabelecidas 5 linhas com espaçamento de 60 cm entre linhas e realizado o plantio. Após o corte e a aplicação da biomassa de estiliosantes foi feito o cultivo de milho, foram determinadas quatro fileiras em cada parcela, com espaçamento de 80 cm entre linha e 20 cm entre plantas e feito o cultivo.

Tabela 2 – Descrição das adubações e plantios dos ciclos experimentais. São Luis, MA. 2023.

Fases experimentais	Descrição	Quantidades
2021 – 2022	Cálcio na forma de gesso agrícola (18% de Ca)	1.000 kg ha ⁻¹
	Silício na forma de terra diatomácea (94,6% de Si)	1.136 kg ha ⁻¹
	Plantio <i>Stylossantes</i>	28/10/2021*
	Corte e deposição da <i>Stylossantes</i>	10.000 kg ha ⁻¹
	P ₂ O ₅ (superfosfato triplo)	1.562 kg ha ⁻¹
	ZnSO ₄ (sulfato de zinco)	65,1 kg ha ⁻¹
	Plantio de Milho cultivar Pioneer 30S31	13/01/2022*
	Aplicação de Ureia (45% de N)	90 kg ha ⁻¹ no período plantio 293 kg ha ⁻¹ no 18 DAP 293 kg ha ⁻¹ no 50 DAP
2022 – 2023	Cálcio na forma de gesso agrícola (18% de Ca)	1.000 kg ha ⁻¹
	Silício na forma de terra diatomácea (94,6% de Si)	1.136 kg ha ⁻¹

	Plantio de Biomassa (<i>Stylossantes</i>)	23/06/2022*
	Aplicação de <i>Leucena</i> e <i>Gliricidia</i>	20.000 kg ha ⁻¹
	MAP (fosfato monoamônico) e Cloreto de potássio	260,312 kg ha ⁻¹ MAP e 24,37 kg ha ⁻¹ KCl
	Corte e deposição da <i>Stylossantes</i>	Total: 308 kg de biomassa 11 kg por parcelas
	Aplicação de Ureia (45% de N)	109,37 kg ha ⁻¹ no período plantio 218,75 kg ha ⁻¹ 50 DAP
	Plantio do milho cultivar AG 1051	24/01/2023*

DAP: dias após o plantio; O corte da estiliosante ocorreu durante o estágio fenológico de florescimento. *data de plantio.

2.3 Coleta e tratamentos das amostras

As amostras de solo foram coletadas com trado holandês do tipo sonda com diâmetro de 100 mm, em pontos previamente determinados. Foram coletadas três subamostras por parcela, na profundidade de 0-10 cm e 10-20 cm, que foram homogeneizadas e geraram uma amostra composta por parcela, com total de 64 amostras para representação da área. As amostras foram mantidas em condições próximas às de coleta até a chegada ao laboratório, onde foram peneiradas em malha de 2 mm e armazenadas. Para as análises biológicas as amostras foram mantidas sob refrigeração em geladeira a 4° C e, para as análises físicas e químicas, foram secas ao ar e mantidas em sacos plásticos.

2.4 Variáveis avaliadas

2.4.1 Análise dos cátions polivalentes

Os cátions polivalentes Ca e Si foram determinados com a solução de cloreto de potássio (KCl) para extração do cálcio por titulação (TEIXEIRA *et al*, 2017), e cloreto de cálcio (CaCl₂) para extração do silício disponível pelo método colorimétrico (KORNDÖRFER *et al.*, 2004). Os teores de cálcio nas soluções extratoras foram determinados por titulação com EDTA 0,0125 mol L⁻¹. Para silício fez-se a leitura em Espectrofotômetro no comprimento de onda de 660 nm.

2.4.2 Fracionamento granulométrico da matéria orgânica do solo

O fracionamento granulométrico da MOS foi realizado de acordo com o método adaptado de Cambardella e Elliott (1992). O princípio do método consiste em separar o carbono orgânico do solo em duas frações: carbono orgânico particulado (COP) e carbono associado aos minerais (COAM).

Foram pesados 10 gramas de solo seco ao ar e peneirados em malha de 2 mm em copos de polietileno de 250 ml, e adicionados 40 ml de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio (5 g L⁻¹). Em seguida, as amostras foram agitadas por 15 horas em agitador horizontal, com 130 RPM, passadas por peneira de malha de 0,053 mm (270 Mesh) e enxaguadas várias vezes com água destilada até a remoção total da argila. O material particulado retido na peneira, ou fração particulada (FP), foi transferido para potes de plástico com auxílio de jatos de água e, seco em estufa de circulação de ar forçada a 50°C até atingir massa constante.

Após a secagem, o material foi pesado, determinando-se assim a massa da fração particulada (MFP). Em seguida, moído e homogeneizado para então ser submetido à determinação do carbono orgânico total (SPARKS, 1996), que consiste na oxidação do carbono via dicromato de potássio, obtendo-se o teor de carbono da fração particulada do solo (CFP), sendo possível calcular o teor de carbono orgânico particulado (COP) do solo, de acordo com a equação a seguir:

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

Onde: COP = teor de carbono orgânico particulado do solo, em g kg⁻¹; CFP = teor de carbono da fração particulada, em g kg⁻¹; MFP = massa da fração particulada, em gramas; Ps = massa da amostra inicial do solo, em gramas (10 gramas).

O teor de carbono orgânico associado a minerais (COAM) foi calculado pela diferença entre o carbono orgânico total e o carbono orgânico particulado, de acordo com a equação a seguir:

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

2.4.3 Quociente metabólico (qCO₂)

O quociente metabólico (qCO₂) foi determinado segundo metodologia proposta por Anderson e Domsh (1993) através da relação da respiração microbiana/biomassa microbiana e seu valor expresso em mg C-CO₂.g⁻¹ CBM h⁻¹.

A respiração microbiana (RM) foi estimada pelo CO₂ evoluído a partir de 25 g de solo durante 167 h, com extração através de NaOH 1 mol L⁻¹ e titulação com HCl 0,5 mol L⁻¹ (ALEF & NANNIPIERI, 1995). Enquanto a determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (CBM) foi feita pelo método de irradiação-extração, metodologia adaptada de Islam & Weil (1998) e Brookes *et al.* (1982) utilizando-se, em lugar do clorofórmio, o forno de micro-ondas (2.450 Mhz, marca Brastemp, modelo BMS45CBBNA) para eliminar os

microrganismos e liberar os componentes celulares. Foram pesadas 10 g de cada amostra de solo em placas de petri, totalizando 4 placas de petri por amostra de solo. Duas placas contendo solo foram submetidas ao processo de irradiação no micro-ondas por 120 segundos, período determinado pelo cálculo de potência do micro-ondas e do tempo de exposição, e duas foram mantidas sem irradiação. Posteriormente, as amostras foram submetidas a uma extração rápida, com K_2SO_4 0,5 mol L⁻¹, procedendo-se sequencialmente à determinação do carbono (DA SILVA; DE AZEVEDO & DE-POLLI, 2007). O carbono da biomassa microbiana do solo (CBMS) foi calculado pela equação:

$$CBMS = \frac{(CI - CN)}{Kc}$$

Onde: CBMS = carbono da biomassa microbiana do solo em mg de C por kg de solo; CI = quantidade de C (mg kg⁻¹) recuperada na amostra irradiada; CN = quantidade de C (mg kg⁻¹) recuperada na amostra não irradiada; kc = fator de correção que representa a eficiência do extrator em extrair C da biomassa microbiana do solo (adimensional), kc = 0,33 (SPARLING & WEST, 1988).

2.4.4 Quociente microbiano (qMIC)

O quociente microbiano expressa quanto do carbono orgânico do solo corresponde a biomassa microbiana e foi calculado expressando o carbono da biomassa microbiana (CBM) como uma porcentagem do carbono orgânico total (C-org) do solo, conforme equação:

$$qMIC (\%) = \frac{CBMS}{COT}$$

Onde: CBMS: carbono da biomassa microbiana, em mg CBM. kg⁻¹ solo seco; COT: carbono orgânico do solo, em g C kg⁻¹ solo seco.

Para o cálculo desse índice foi usado o resultado do teor de C encontrados nos extratos na determinação de biomassa microbiana e o carbono orgânico total foi determinado pelo método adaptado de Sparks (1996).

2.4.5 Análises estatísticas

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), teste de homogeneidade, normalidade e teste de Tukey e/ou LSD para a comparação das médias das variáveis obtidas de cada tratamento ao nível de 5 % de significância. Foi realizada a correlação linear de Pearson. Para isso foram utilizados os pacotes exp.DES.pt, GGally e ggplot2 no software R versão 4.1.3 (2021).

3 RESULTADOS

3.1 Quociente metabólico (qCO₂)

Os solos não enriquecidos com os cátions polivalentes apresentaram os maiores teores de quociente metabólico, L, L+U e U, com teores médios de 25,63; 25,47; 17,42 mg C-CO₂.g⁻¹ CBM h⁻¹, respectivamente. O tratamento com Si+L foi o que apresentou menor valor médio, 6,82 mg C-CO₂.g⁻¹ CBM h⁻¹, comparado ao tratamento L e L+U, Si+L foi cerca de 58% inferior. Os tratamentos Si+L+U; Ca+Si+L+U; Ca+L e Ca+L+U, não diferiram estatisticamente de Si+L e apresentaram teores em média 37% inferior a L e L+U (Fig. 2).

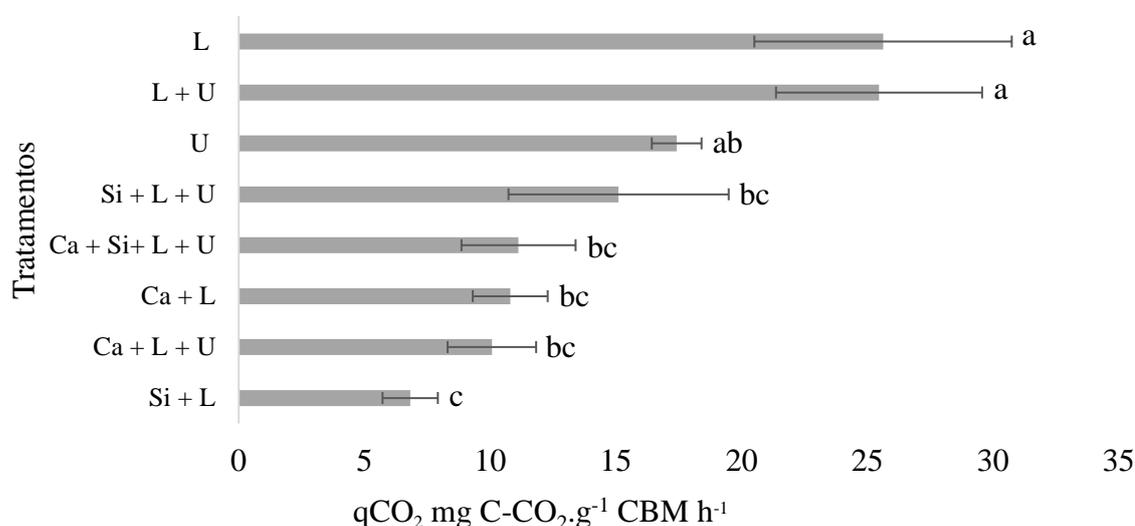


Figura 2 - Quociente metabólico (mg C-CO₂.g⁻¹ CBM h⁻¹) na profundidade de 0-10 cm. Tratamentos 1) U (ureia); 2) L (leguminosas); 3) L + U (leguminosas + ureia); 4) Ca + L (cálcio + leguminosas); 5) Si + L (silício + leguminosas); 6) Ca + L + U (cálcio + leguminosas + ureia); 7) Si + L + U (silício + leguminosas + ureia) e; 8) Ca + Si + L + U (cálcio + silício + leguminosas + ureia). Médias seguidas por letras diferentes indicam diferenças entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3.2 Quociente microbiológico (qMic)

Quanto ao quociente microbiológico, o tratamento Si+L apresentou maior valor de atividade microbiológica no solo, 6,95%, não diferindo estatisticamente do tratamento Ca+L com 5,57%. No tratamento L+U observou-se os menores teores de quociente microbiológico, o qual obteve valor em média 40% inferior a Si+L e Ca+L (Fig. 3). Não houve diferença estatística entre Ca+L e os tratamentos Si+L+U; L; Ca+L+U; U; Ca+Si+L+U, os tratamentos tiveram teores em média 16% superior a L+U.

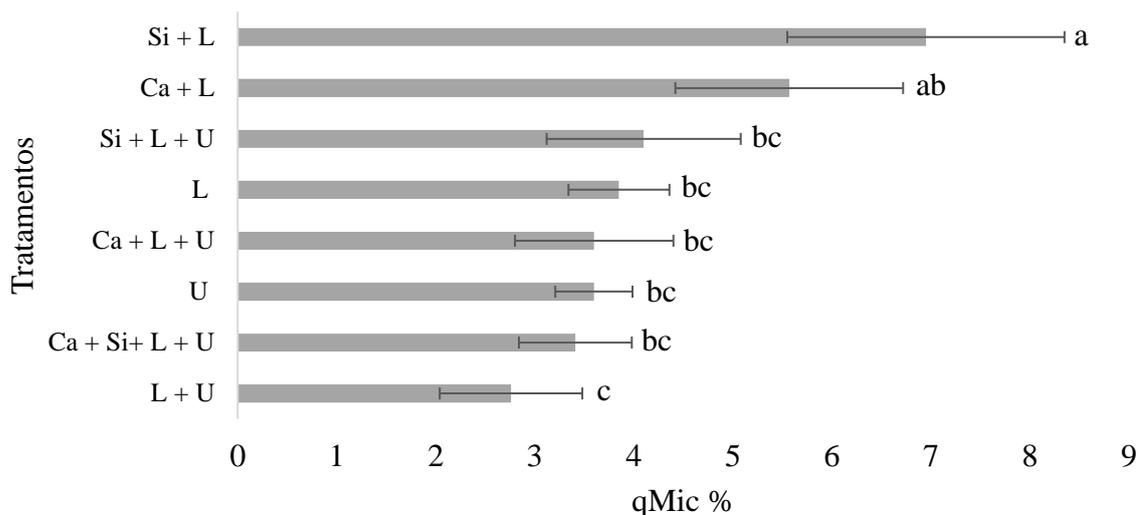
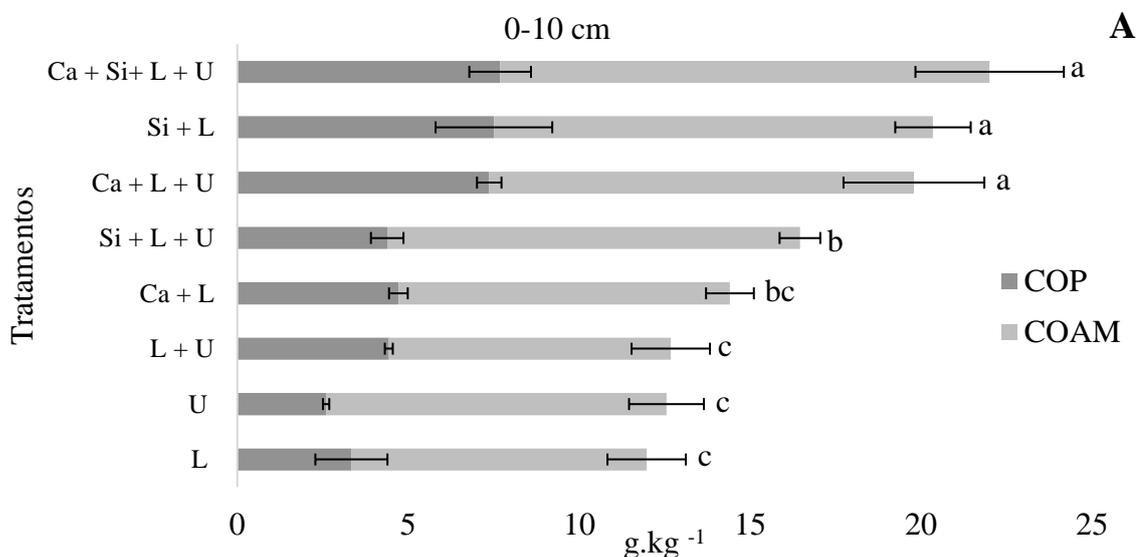


Figura 3 - Quociente Microbiológico (%) na profundidade de 0-10 cm. Tratamentos 1) U (ureia); 2) L (leguminosas); 3) L + U (leguminosas + ureia); 4) Ca + L (cálcio + leguminosas); 5) Si + L (silício + leguminosas); 6) Ca + L + U (cálcio + leguminosas + ureia); 7) Si + L + U (silício + leguminosas + ureia) e; 8) Ca + Si + L + U (cálcio + silício + leguminosas + ureia). Médias seguidas por letras diferentes indicam diferenças entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3.3 Frações do carbono orgânico

O maior conteúdo de carbono orgânico total foi encontrado na profundidade de 0-10 cm e, em todos os tratamentos, o carbono orgânico associado aos minerais foi cerca de 36% superior ao carbono orgânico particulado na profundidade 0-10 cm e 58% superior na profundidade de 10–20 cm (fig. 4). Os tratamentos Ca+Si+L+U, Si+L, Ca+L+U apresentaram as maiores médias (DP 0.2) em ambas as profundidades, e não diferiram estatisticamente na profundidade 0-10 cm, comparados ao tratamento com menor conteúdo de carbono orgânico total os três tratamentos foram cerca de 26% superior na profundidade de 0-10 cm e 10% superior na profundidade de 10-20 cm.



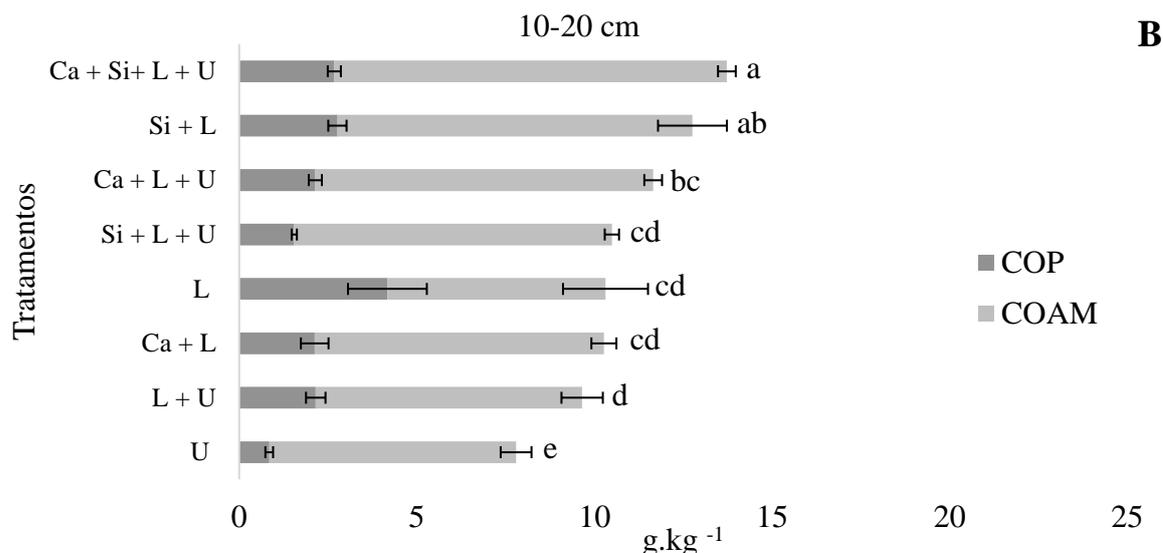


Figura 4 - Frações do carbono; carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COAM) nas profundidades de A) 0 – 10 cm e B) 10 - 20 cm (g.kg⁻¹). O carbono orgânico total (COT) é representado pela soma das duas frações. Tratamentos 1) U (ureia); 2) L (leguminosas); 3) L + U (leguminosas + ureia); 4) Ca + L (cálcio + leguminosas); 5) Si + L (silício + leguminosas); 6) Ca + L + U (cálcio + leguminosas + ureia); 7) Si + L + U (silício + leguminosas + ureia) e; 8) Ca + Si + L + U (cálcio + silício + leguminosas + ureia). Médias seguidas por letras diferentes indicam diferenças entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3.4 Cálcio

O maior teor de cálcio foi encontrado nas áreas que receberam o gesso agrícola, Ca+Si+L+U, Ca+L e Ca+L+U, principalmente na camada de 0-10 cm (fig. 5). Comparados ao tratamento L+U que apresentou os menores teores de cálcio nas duas profundidades, os solos que receberam gesso tiveram em média 44% a mais de cálcio na camada de 0-10 cm e 56% na camada de 10-20 cm. O tratamento Si+L não apresentou diferença estatística do Ca+L+U, comparado a Ca+L+U, Si+L obteve o teor de cálcio apenas 8% inferior.

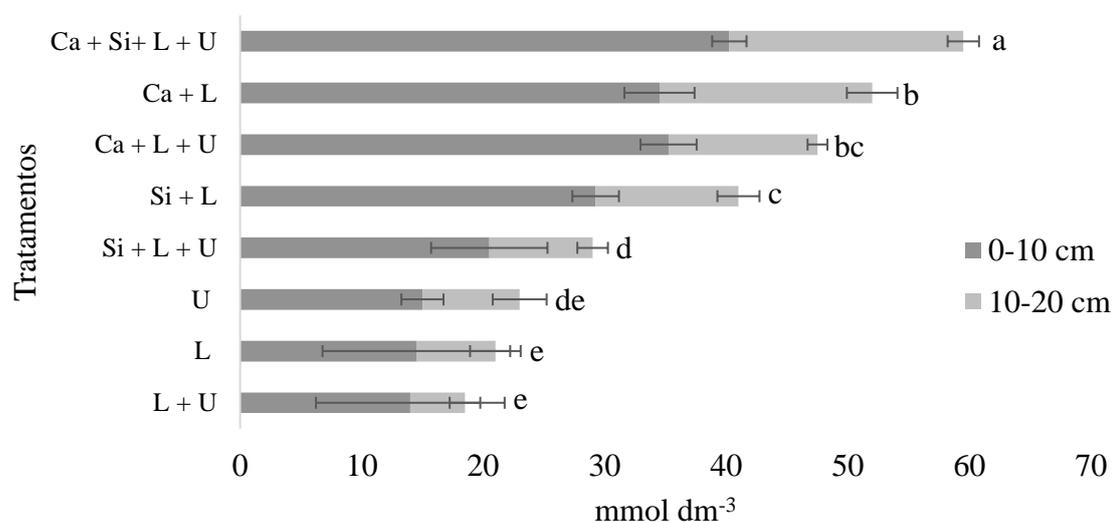


Figura 5 - Teores de cálcio disponível (mmol dm^{-3}) no solo nas profundidades de 0 – 10 cm e 10 - 20 cm. Tratamentos 1) U (ureia); 2) L (leguminosas); 3) L + U (leguminosas + ureia); 4) Ca + L (cálcio + leguminosas); 5) Si + L (silício + leguminosas); 6) Ca + L + U (cálcio + leguminosas + ureia); 7) Si + L + U (silício + leguminosas + ureia) e; 8) Ca + Si + L + U (cálcio + silício + leguminosas + ureia). Médias seguidas por letras diferentes indicam diferenças entre si pelo teste de LSD a 5% de probabilidade.

3.5 Silício

Na camada de 10-20 cm o teor de silício foi cerca de 24% inferior à camada de 0-10 cm. As áreas que receberam terra diatomácea, Ca+Si+L+U; Si+L+U; Si+L, apresentaram cerca de 5% de silício a mais que as outras áreas na camada de 0-10 cm, na camada de 10-20 cm as concentrações de Si foram similares em todas as áreas. Os tratamentos Ca+L+U; Ca+L e L não diferiram estatisticamente de Si+L+U e Si+L, os teores de Si nos três tratamentos foram apenas 2% inferior ao encontrado no Si+L.

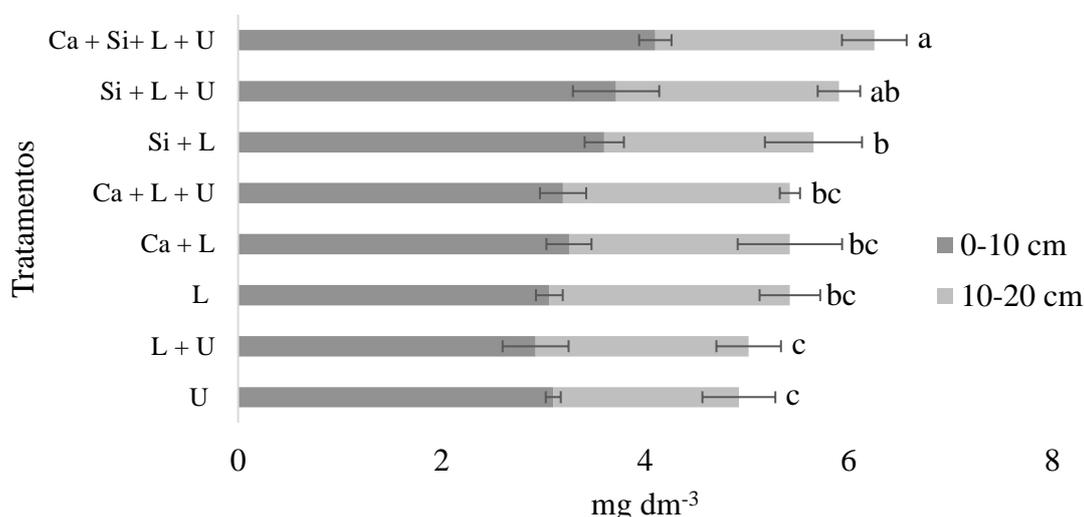


Figura 6. Teores de silício disponível (mg dm^{-3}) no solo nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm. Tratamentos 1) U (ureia); 2) L (leguminosas); 3) L + U (leguminosas + ureia); 4) Ca + L (cálcio + leguminosas); 5) Si + L (silício + leguminosas); 6) Ca + L + U (cálcio + leguminosas + ureia); 7) Si + L + U (silício + leguminosas + ureia) e; 8) Ca + Si + L + U (cálcio + silício + leguminosas + ureia). Médias seguidas por letras diferentes indicam diferenças entre si pelo teste de LSD a 5% de probabilidade.

3.6 Correlação entre os parâmetros avaliados

Correlações positivas significativas foram encontradas entre o carbono orgânico total (COT), o carbono orgânico particulado (COP) e o carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e a presença dos cátions (Ca e Si). O quociente metabólico apresentou correlação negativa significativa com todas as variáveis. O acúmulo de carbono derivado da biomassa, representado pelo $q\text{Mic}$, apresentou correlação positiva embora não significativa com todas as variáveis com exceção do $q\text{CO}_2$ (Fig. 7).

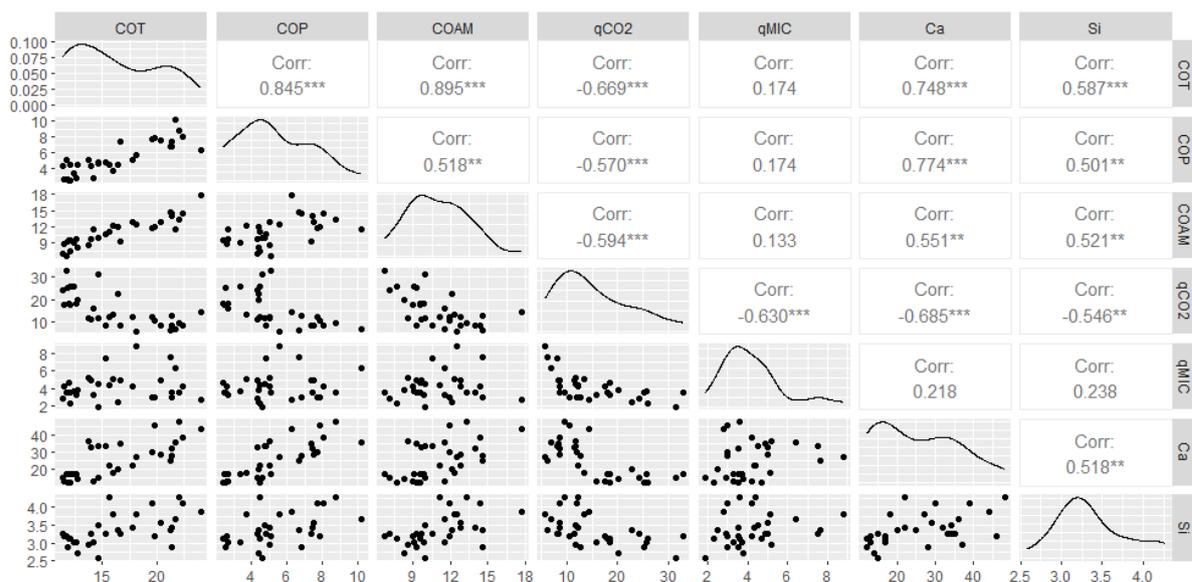


Figura 7 - Correlação Linear de Pearson entre os quocientes biológicos (qCO₂ e qMIC), o fracionamento da matéria orgânica (COT, COP e COAM) e os cátions (Ca e Si) no solo na profundidade 0-10 cm. *- significativo a 5%; ** - significativo a 1%; *** significativo a 0,1%.

4 DISCUSSÃO

4.1 Quociente metabólico (qCO₂)

Os microrganismos e a estrutura do solo são duas propriedades ligadas e fundamentais que determinam muitas funções biológicas importantes, como renovação e transformações de nutrientes e a mineralização de carbono (C), que em tese sustentam a fertilidade do solo (BLAUD *et al.* 2017). O quociente metabólico, fisiologicamente, descreve o substrato mineralizado por unidade de carbono da biomassa microbiana e expressa a dinâmica de crescimento dos microrganismos e da formação de produtos. Os microrganismos do solo assimilam o carbono vegetal para o seu crescimento e liberam CO₂ como produtos extracelulares e, o equilíbrio desse anabolismo e catabolismo é definido como a eficiência de uso do carbono microbiano (EUC) (DOS REIS JÚNIOR & MENDES, 2007).

Lavallee *et al.* (2018) definiram que a eficiência do uso do carbono microbiano (EUC) é a quantidade de carbono derivado do insumo recuperado no solo versus a quantidade de carbono perdida durante a decomposição de tal insumo. Assim, mais biomassa microbiana e menos respiração resulta em menor qCO₂ e maior EUC, porque mais do substrato assimilado permanece nas células em vez de ser respirado, o que gera possível estabilização do carbono nos solos (MANZONI *et al.*, 2012; ALLISON, 2014).

Observou-se maior quociente metabólico nas áreas com L, L+U e U, o que indica perda de C na forma de CO₂. Altos valores de qCO₂ mostram que a eficiência da atividade microbiana do solo está baixa e que os microrganismos do solo estão sob estresse ambiental, desviando

energia do crescimento e reprodução para sua manutenção (ODUM, 1969; WARDLE & GHANI, 1995). Os baixos teores encontrados nos tratamentos com cálcio e silício (fig. 2) indicam que nessas áreas os microrganismos do solo assimilaram mais C e liberaram menos CO₂.

Em todas as áreas onde se encontrou menor quociente metabólico nota-se a presença dos cátions (fig. 2). Com esses resultados é possível afirmar que a presença dos cátions Ca e Si em consórcio com a biomassa de alta qualidade auxiliam para que a microbiota consumisse menos energia para incorporar o carbono a sua biomassa, o que faz com que a estabilidade do C-org da matéria orgânica do solo aumente e seja liberado menos CO₂ para a atmosfera através da respiração. Tal fato pode ser explicado pelas características dos cátions que formam complexos organo-mineral ou organo-cátion com moléculas orgânicas do solo e oferecem proteção química ao carbono, que ajudam a preservar a matéria orgânica (SUTTON *et al.* 2005, JASTROW; AMONETTE & BAILEY, 2007; SPOSITO, 2008).

Estudos demonstram relações positivas de cátions polivalentes com a estabilidade do carbono orgânico do solo (ROWLEY *et al.*, 2018; SONG *et al.*, 2018; DLAMINI *et al.*, 2019). O Si também é discutido como um sumidouro de CO₂, porque a formação de carbonato de cálcio a partir de silicatos de cálcio mobiliza ácido silícico e liga CO₂ (KÖHLER, *et al.* 2010, BEERLING, *et al.* 2020). A presença Ca também foi relacionada a diminuição da taxa de respiração por unidade carbono em experimentos de incubação (SOLLINS *et al.*, 1996; WHITTINGHILL & HOBBIE, 2012; MINICK *et al.*, 2017, ROWLEY *et al.*, 2018).

Nos tratamentos que receberam ureia esperava-se que a contribuição do nitrogênio na decomposição da MOS mediada pelos microrganismos fosse maior que o fluxo de decomposição nas áreas sem ureia, já que enriquecimento de N estimula a biomassa microbiana, através do aumento da decomposição da serrapilheira facilitando assim o acúmulo de necromassa e conseqüentemente, o acúmulo de C-org (RAIESI, 2004; SOONG *et al.*, 2020; FAN *et al.*, 2020). Erisman *et al.* (2013) e Han *et al.* (2015) afirmam que, embora a deposição de N aumente sua disponibilidade e a produtividade primária líquida em alguns ecossistemas, a presença de N em grandes doses pode causar efeitos ecológicos negativos. A adição de N pode aliviar a limitação de N para alguns micróbios nitrificadores e desnitrificadores que usam N inorgânico como suas fontes de energia ou aceitadores de elétrons, entretanto, micróbios fixadores de N₂ podem diminuir devido alto custo energético.

Se os microrganismos não forem limitados pela disponibilidade de N, a adição de N não deve apresentar efeito sobre a biomassa microbiana (AVERILL & WARING, 2018,

CAMENZIND, *et al.*, 2023). A presença de N além do suportado pelo microrganismo reduz a alocação de C fotossintético para as raízes e potencializa a lixiviação de magnésio e cálcio, e a mobilização de alumínio, o que resulta no declínio da biodiversidade microbiana (TRESEDER, 2008; TIAN & NIU, 2015; TANG *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2018). Cotrufo *et al.* (2021) afirmam que quando o N está disponível acima da demanda microbiana, o N pode ser perdido do sistema, por ter seu ciclo desacoplado do ciclo do C.

Efeitos negativos de doses de N superiores a 100 kg ha⁻¹ sobre a biomassa microbiana foi relatado por Zhou *et al.* (2017), ZHANG *et al.* (2018) e, MA *et al.* (2021). A meta análise conduzida por Jia *et al.* (2020) mostrou que a CBM aumentou com o enriquecimento de N inferiores a 50 kg ha⁻¹ e diminuiu com doses maiores de N. Com isso para um melhor entendimento dos efeitos da aplicação do nitrogênio no sistema, investigações em dosagens variadas são recomendadas.

4.2 Quociente microbiológico (qMic)

O quociente microbiológico do solo é um indicador que faz a relação do CBM e o C-org. De acordo com Jenkinson e Ladd (1981) esse quociente microbiológico é avaliado para comparar solos com diferentes frações de matéria orgânica. Segundo esses autores um valor de 2,2% reflete um bom equilíbrio entre ambas as frações de carbono em solos cultivados. Com base nessa afirmação todos os tratamentos apresentaram taxa de equilíbrio entre o CBM e o C-org.

Sparling (1992) afirma que variações do qMic fornecem dados sobre a eficiência da conversão do C-org em CBM, estabilização do C-org na fração mineral do solo e as suas perdas. Assim, os maiores valores de qMic observados nos tratamentos silício + leguminosa e cálcio + leguminosa (Fig. 3), indicam que os microrganismos imobilizaram maiores quantidades de carbono em suas células, e isso significa que ocorreu maior incorporação do carbono orgânico do solo na biomassa microbiana (DADALTO *et al.*, 2015).

Ambos os tratamentos proporcionaram condições favoráveis para que os microrganismos imobilizassem biologicamente o carbono derivado da biomassa do solo que, conseqüentemente aumenta o acúmulo de COS, resultado comprovado pelos altos valores de qMic e baixos valores de qCO₂ observados nesses dois tratamentos. Wardle (1992) alega que alta relação CBM:C-org é associada a uma matéria orgânica de boa qualidade, a qual é fornecida pelas biomassas das leguminosas utilizadas.

Os demais tratamentos embora tenham apresentado equilíbrio entre as proporções de carbono, os resultados mostram que as condições criadas para o metabolismo do solo são

menos favoráveis, o que indica relativa perda de C do solo (MERCANTE *et al.*, 2004). Com exceção do tratamento com leguminosas, todas as áreas com menor valor de q_{Mic} tem a presença de ureia. Zhang *et al.* (2016) e Ma *et al.* (2020) declararam que a adição de N pode reduzir a contribuição de resíduos de C-microbiano para COS em solos tropicais e subtropicais.

4.3 Frações do carbono orgânico

O COAM são fragmentos microscópicos de material orgânico que foram lixiviados de materiais vegetais ou que foram transformados quimicamente pela biota do solo. Por estar associado aos minerais do solo, o COAM tende a persistir por mais tempo que o COP, o tempo médio de resistência do COAM varia de década a séculos (KLEBER, *et al.*, 2015; LAVALLEE, SOONG & COTRUFO, 2020).

De acordo com os resultados (fig. 4) a maior contribuição para o carbono orgânico total nas duas profundidades analisadas dá-se pelo conteúdo do carbono associado aos minerais, o qual apresentou resultados superiores ao carbono orgânico particulado e, maior concentração nos tratamentos onde houve a adição dos cátions polivalentes, com exceção do tratamento cálcio + leguminosa, que teve valor inferior ao tratamento apenas com leguminosa na profundidade 10–20 cm. Isso indica que a aplicação dos cátions e biomassa de alta qualidade no solo tem efeitos complementares que beneficiam a estabilidade e o aumento do teor de carbono orgânico no solo.

A deposição de plantas como cobertura do solo tem sido recomendada para garantir a viabilidade econômica dos agroecossistemas tropicais, pois fornece cobertura do solo, retarda a perda de umidade, aumenta a matéria orgânica do solo e libera nutrientes após a decomposição (JUN *et al.*, 2014). Estudos mostram boas relações entre o uso de gliricídia e leucena no acúmulo de carbono no solo (AGUIAR *et al.*, 2010; MOURA *et al.*, 2021; SENA *et al.*, 2020) e a aplicação de estilosantes aumentou o teor de matéria orgânica do solo comparada a cobertura com capim mombaça no estudo realizado por Santos *et al.* (2012). Essas leguminosas fixadoras de nitrogênio de alta produção de biomassa, baixa relação C/N, baixo teor de lignina e polifenóis que se decompõem rapidamente, podem ter um efeito nutricional direto como adubo verde (MOURA *et al.*, 2021).

Outra prática benéfica à agricultura nas regiões tropicais é o aumento dos cátions polivalentes na zona radicular do solo (QUESADA *et al.*, 2020; MOURA, 2020). Segundo Rowley *et al.* (2018), a presença dos cátions pode estabilizar o COS por meio de ligações organo-cations ou interações organo-minerais. Por serem doadores de elétrons, cada grupos de carbonila e carboxila presente na MO representa um parceiro individual para a interação com

cátions polivalentes. Essas ligações removem o carbono orgânico da solução do solo e transferem para a fase sólida, o que aumenta a estabilidade do COS e reduz a sua disponibilidade para enzimas degradantes (KAISER E GUGGENBERGER, 2000; KALBITZ *et al.* 2005, ELLERBROCK & GERKE, 2018). Outra forma de contribuição dos cátions polivalentes para a estabilização do COS é a oclusão em agregados. Conforme Wuddivira e Camps-Roach (2007) os cátions polivalentes e a argila podem atuar como um material de cimentação que mantém as partículas dos agregados unidas e retém o COS ocluso dentro dos seus poros.

Segundo Cotrufo *et al.* (2013), a adição de nitrogênio no sistema pode mudar a formação de matéria orgânica no solo da fração particulada para a fração associada aos minerais. Os resultados obtidos em nosso estudo não foram contrários a essa afirmação, entretanto, o COAM foi superior ao COP em proporções semelhantes tanto nos tratamentos com a adubação nitrogenada quanto nas áreas sem N.

O C orgânico é armazenado através de uma infinidade de compostos químicos, muitos dos quais contêm N ou demanda de N (COTRUFO *et al.*, 2021). Na profundidade de 0-10 cm os tratamentos com a adição de nitrogênio tiveram valores de COT superior aos tratamentos sem a adubação nitrogenada, com exceção do tratamento silício + leguminosa. Esses resultados mostram uma interação positiva do nitrogênio com a dinâmica do C orgânico total no solo, entretanto, na profundidade de 10–20 cm não se observa esse comportamento.

Pesquisas realizadas por Moura *et al.* (2018), Sena *et al.* (2020), Feitosa *et al.* (2021) na região da periferia amazônica mostram interação positiva entre a adubação nitrogenada e o consórcio de leguminosas no acúmulo de carbono orgânico no solo em diferentes profundidades, todavia esse comportamento é observado em doses de N inferiores à usada neste estudo, ressalta-se a necessidade de avaliar diferentes dosagens de nitrogênio para compreender melhor a resposta da adição de N no COS nos solos no trópico úmido.

Na camada de 0-10 cm os valores mais altos de COT nos tratamentos com os cátions indicam redução da perda de C na forma de CO₂ para a atmosfera e aumento na eficiência do uso do carbono microbiano no sistema, o que se espera que ocorra a partir do aumento da fração estável da matéria orgânica do solo, constatação comprovada pelo aumento de COAM (fig.4) e pelo menor quociente metabólico encontrados nos tratamentos com cálcio e silício (fig. 2).

4.4 Cálcio

De acordo com Kordlaghari e Rowell (2006) por ser uma fonte de Ca disponível, a aplicação de gesso pode aumentar a atividade do íon cálcio na fase líquida do solo, o que

possibilita a ligação entre o cátion e grupos funcionais da matéria orgânica e esse é um dos principais mecanismos no processo de estabilização do COS mediada por cálcio (ROWLEY *et al.*, 2018). As áreas com maior teor de Ca estão entre os tratamentos com maior quantidade de carbono orgânico total (fig. 4), e com menor quociente metabólico. Com isso nota-se que a aplicação do gesso além de beneficiar a atividade microbiológica, potencializa a estabilidade do C-org. No estudo realizado por Moura *et al.* (2018) a aplicação de gesso associado a resíduos de leguminosas também teve influência positiva nos teores de cálcio e na quantidade de C-org total, o que ocorre sobretudo pela proteção química oferecida pelo cálcio através da formação de fortes ligações envolvendo Ca e os coloides orgânicos (MOORE & TURUNEN, 2004).

O tratamento silício + leguminosa apresentou concentração de Ca similar as áreas que receberam o gesso agrícola provavelmente pelas aplicações de gesso feitas anteriormente na área. A reação de cálcio com o silício pode gerar metassilicato de cálcio (CaSiO_3) e a neutralização dessa reação liberar íons de cálcio (ALCARDE, 1992).

4.5 Silício

A solubilidade do silício na solução do solo está baseada no pH, no teor de argila, no teor de óxidos de ferro e de alumínio e na sua reserva de silício, a sua disponibilidade nos solos pode variar de menos de 1 até mais de 100 mg dm^{-3} (JONES & HANDRECK, 1963; FREITAS *et al.*, 1977; RAVEN, 1983; MEYER & KEEPING, 2001; CAMARGO *et al.*, 2007).

Por sofrer influência do pH, o uso do calcário em solos pode afetar a química do silício e aumentar sua disponibilidade através da dissolução de silicato de cálcio (CAMARGO *et al.*, 2007). A possível formação de composto Si-Ca nas áreas que receberam o gesso agrícola é tratada como parte dos controles biológicos da disponibilidade de Si em ecossistemas terrestres. Camargo *et al.* (2007) na avaliação de silício por cloreto de cálcio em solos tropicais de textura arenoso observaram que os teores de silício foram superiores em área que tiveram o aumento do teor de cálcio.

Outra prática comum na agricultura que pode alterar a química do silício é a adubação fosfatada. O fósforo pode mudar a solubilidade do silício devido à competição pelos mesmos sítios de adsorção. O fósforo pode ocupar as superfícies adsorvedoras, com menor atração para o silício, o que faz com que o Si seja liberado na solução do solo. Dessa forma, uma maior concentração de P deslocaria o silício, o qual estaria passivo de lixiviação, adsorção em óxidos e hidróxidos de Fe e Al, e a absorção pelas plantas (OLIVEIRA *et al.*, 1984; LIMA FILHO; LIMA & TSAI, 1999; NASCIMENTO, CUNHA & RODRIGUEZ, 2009). Segundo

Matichenkov & Calvert (2002) e Karathanasis (2006) este processo ocorre em maior grau em ambientes tropicais.

Os resultados obtidos mostram que pode ter ocorrido a formação de compostos que facilitaram lixiviação do silício ou a absorção pelas plantas. A aplicação de P na forma de superfosfato, pode ter deslocado o silício dos colóides do solo. Na pesquisa realizada por Camargo *et al.* (2006) os teores de silício solúvel encontrado nas áreas sem fósforo foram superiores a áreas que receberam. Princípio de sorção recíproca justifica essas reações químicas. Por ocuparem os mesmos sítios de adsorção, P deslocaria mais facilmente o Si, com isso, ao acrescentar fósforo o teor de silício capaz de ser retido seria menor (OLIVEIRA *et al.*, 1984). Logo, avaliar a correlação dos teores de silício e os teores de P, Fe, Al e silício na planta ajudariam a compreender o comportamento do processo de adsorção e absorção do silício no solo.

4.6 Correlação entre os parâmetros avaliados

Pela análise de correlação foi possível observar que o cálcio e o silício exercem influência significativa e positiva sobre o C-org particulado, associado aos minerais e total. Isso sugere que a interação de Ca, Si e carbono orgânico do solo pode promover a formação de pontes trocáveis, que fazem parte da formação dos complexos organo-minerais e/ou organocátions e favorecem o processo de adsorção do C-org na fase sólida. O cálcio e o silício podem oferecer proteção química ao COS, por serem íons bivalentes, as pontes formadas por Ca e Si oferecem maior tempo de residência, o que evita a degradação microbiana do carbono e promove o seu acúmulo e persistência no solo (BALDOCK, SKJEMSTAD, 2000; JASTROW, AMONETTE, BAILEY, 2007; ROWLEY, *et al.* 2018).

Devido a sua elevada área superficial e porosidade, o silício pode preencher ou adsorver intimamente o C-org em suas cavidades ou o adsorver frouxamente em suas superfícies externas, o que minimiza a sua exposição a microrganismo e enzimas degradantes o que influencia a sua estabilidade (SONG *et al.*, 2018). Já o cálcio pode auxiliar na estabilização do carbono orgânico do solo por agir contra sua decomposição e/ou lixiviação através dos processos de esfera interna e externa, com a formação das pontes trocáveis ou com reações de quimissorção direta (ESSINGTON, 2004; MINICK *et al.*, 2017; ROWLEY *et al.*, 2018).

A correlação inversamente proporcional e significativa observada entre o quociente metabólico e as variáveis analisadas indicam que o teor de cálcio, silício e o conteúdo de COT, COP e COAM diminuem o qCO_2 , e resultam em maior eficiência no uso do substrato. Isso sugere que essas variáveis podem auxiliar a microbiota a consumir menos energia para

incorporar carbono a sua biomassa, reflexo do efeito positivo na diminuição da atividade microbiana (ANDERSON & DOMSH, 1993; TOTOLA & CHAER, 2002).

A ausência de correlação significativa do quociente microbiano e as frações do carbono e os cátions polivalentes indica que essas variáveis não influenciaram esse quociente biológico diretamente. A correlação inversamente proporcional entre ambos quocientes biológicos indica que a diminuição do qCO_2 influencia positivamente no $qMic$.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A combinação da biomassa de alta qualidade associado com ambos os cátions polivalentes beneficiaram a atividade dos microrganismos e possibilitaram que menos energia fosse liberada na incorporação do C a biomassa microbiana, o que aumenta a imobilização do C derivado da biomassa e proporciona o acúmulo e estabilidade de C-org na matéria orgânica do solo.

A adição de nitrogênio no solo não teve efeito nos quocientes biológicos, mas aumentou o carbono orgânico total na camada de 0-10 cm.

A resposta dos microrganismos ao fornecimento de silício e biomassa de alta qualidade favorece os agricultores com dificuldade de adquirir fertilizantes, pois permite que menos insumos sejam utilizados para melhorar as condições microbiológicas do solo. Sugere-se que mais estudos sobre o comportamento do silício aos longos dos anos sejam feitos para comprovar a eficiência do seu uso em condições de trópicos úmidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A. D. C. F.; BICUDO, S. J.; COSTA SOBRINHO, J. R. S.; MARTINS, A. L. S.; COELHO, K. P.; DE MOURA, E. G. Nutrient recycling and physical indicators of an alley cropping system in a sandy loam soil in the pre-Amazon region of Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 86, p. 189-198, 2010.
- ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez dos solos**. São Paulo: ANDA, 1992. 26 p. (Boletim Técnico, 6).
- ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic Press, 1995.
- ALLISON, S. D. Adaptação de modelagem da eficiência do uso de carbono em comunidades microbianas. **Fronteiras em Microbiologia**, v. 5, p. 571, 2014.
- ANDERSON, J. P. E.; DOMSH, K. H. The metabolic quotient (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environment conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biol. Biochem.**, Oxford, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993.
- ANDRADE, V. S.; VIEIRA, E. S.; PINHEIRO, S. S. C.; PERIN, L.; MENEZES, V. M. M. Respiração e biomassa microbiana em área de cultivo de cana-de-açúcar. **Cadernos de Agroecologia**, v. 15, n. 10, 2020.
- AVERILL, C.; WARING, B. Nitrogen limitation of decomposition and decay: How can it occur? *Global Change Biology*, 24(4), 1417–1427, 2018. <https://doi.org/10.1111/gcb.13980>
- BALDOCK, J. A.; SKJEMSTAD, J. O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic Geochemistry* 31, v. 31, p. 697–710, 2000.
- BEERLING, DJ; KANTZAS, EP; LOMAS, MR; WADE, P.; EUFRÁSIO, RM; RENFORTH, P.; SARKAR, B.; ANDREWS, M.G.; JAMES, R.H.; PEARCE, C.R. Potencial para remoção de CO_2 em larga escala por meio de intemperismo de rochas aprimorado com terras de cultivo. **Natureza**, 583, 242–248, 2020.
- BLAUD, A.; MENON, M.; Van der Zaan, B.; LAIR, G. J.; BANWART S. Efeitos de peneiramento seco e úmido do solo na identificação e interpretação da composição da comunidade microbiana. *Adv Agron* 142:119–142, 2017.
- BRITO, M. F.; TSUJIGUSHI, B.P.; ROCHA, D.P. & SILVA, R. F. Reciclagem de nutrientes de adubos verdes e produtividade de milho cultivado em sucessão em agroecossistema de transição agroecológica. **Acta Iguazu**, vol. 6, n. 3, p. 11-21, 2017.
- BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 14:319-326, 1982.
- BUCKERIDGE, K. M.; CREAMER, C.; WHITAKER, J. Desconstruindo o contínuo de necromassa microbiana para informar o sequestro de carbono no solo. **Ecologia funcional**, v. 36, n. 6, pág. 1396-1410, 2022.
- CAMARGO, M. S. D., KORNDÖRFER, G. H., & PEREIRA, H. S. Solubilidade do silício em solos: influência do calcário e ácido silícico aplicados. **Bragantia**, v. 66, p. 637-647, 2007.
- CAMARGO, M. S.; CORRÊA, G. F.; PEREIRA, H. S.; BARBOSA, D. S.; RESENDE, R. H. Extratores de silício solúvel em solos: influência do calcário e fósforo. 2006.

- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, v. 56. p. 777-783, 1992.
- CAMENZIND, T.; MASON-JONES, K.; MANSOUR, I.; RILLIG, M.C, E LEHMANN, J. Formação de carbono orgânico do solo derivado de necromassa determinado por vias de morte microbiana. **Nature Geoscience**, v. 16, n. 2, pág. 115-122, 2023.
- CORREIA, C. M. *et al.* Ultraviolet-B radiation and nitrogen affect the photosynthesis of maize: a Mediterranean field study. *European journal of agronomy*, v. 22, n. 3, p. 337-347, 2005.
- COTRUFO, M. F.; LAVALLEE, J. M., ZHANG, Y., HANSEN, P. M., PAUSTIAN, K. H., SCHIPANSKI, M., & WALLENSTEIN, M. D. In-N-Out: A hierarchical framework to understand and predict soil carbon storage and nitrogen recycling. **Global Change Biology**, v. 27, n. 19, 2021.
- COTRUFO, M. F.; WALLENSTEIN, M. D.; BOOT, C. M.; DENEFF, K.; PAUL, E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter?. **Global change biology**, v. 19, n. 4, p. 988-995, 2013.
- CPTEC/INPE. Centro de Previsão do Tempo e Pesquisas Climáticas, 2023. Disponível em <https://cptec.inpe.br/home/in> [verificado em 1 maio 2023].
- DA SILVA, E. E.; DE AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. Determinação da força muscular basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂). 2007.
- DADALTO, J. P.; FERNANDES, H. C.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R. & MATOS, A. T. Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. **Engenharia Agrícola**, vol. 35, n. 3, p. 506-513, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n3p506-513/2015>
- DE OLIVEIRA SILVA, M., DOS SANTOS, M. P., DA PAZ SOUSA, A. C., DA SILVA, R. L. V., DE MOURA, I. A. A., DA SILVA, R. S., & DA SILVA COSTA, K. D. Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 6853-6875, 2021.
- DLAMINI, Phesheya *et al.* Catena Chemical stabilisation of carbon stocks by polyvalent cations in plinthic soil of a shrub-encroached savanna grassland, South Africa. *Catena*, v. 181, n. November 2018, p. 10, 2019.
- DOS REIS JUNIOR, F. B.; MENDES, I. de C. **Biomassa microbiana do solo**. 2007.
- DUARTE, I. B.; GALLO, A. S.; GOMES, M. S.; GUIMARÃES, N. F.; ROCHA, D. P. & SILVA, R.F. Plantas de cobertura e seus efeitos na biomassa microbiana do solo. **Acta Iguazu**, vol. 3, n. 2, p. 150-165, 2014.
- ELLERBROCK, R. H.; GERKE, H. H. Explaining soil organic matter composition based on associations between OM and polyvalent cations. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 181, n. 5, p. 721-736, 2018.
- ERISMAN, J. W.; GALLOWAY, J. N.; SEITZINGER, S.; BLEEKER, A.; DISE, N. B.; PETRESCU, A. M. R.; LEACH, A. M.; DE VRIES, W. Consequências da modificação humana do ciclo global do nitrogênio. *Transações Filosóficas da Royal Society B: Ciências Biológicas* 36820130116, 2013.

ESSINGTON, M. E. Soil and water chemistry. An integrative approach. CRC Press, Boca Raton, 2004.

FAN, Y. X., YANG, L. M., ZHONG, X. J., YANG, Z. J., LIN, Y. Y., GUO, J. F., CHEN, G., & YANG, Y. S. N addition increased microbial residual carbon by altering soil P availability and microbial composition in a subtropical Castanopsis forest. *Geoderma*, 375, 2020. 114470. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114470>

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.

FREITAS, L. C.; COSTA FILHO, J. F. da; ALOISI, R. R.; MELO, W. J. Contribuição ao estudo da sílica solúvel em alguns perfis de solos. *Científica*, Jaboticabal, v.5, n.2, p.296-305, 1977.

GIAROLA, N. F. B.; DA SILVA, A. P. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. **ciência agric.**, 2002.

GIONGO, V.; MENDES, A. M. S.; CUNHA, T. J. F. & GALVÃO, S. R. S. Decomposição e liberação de nutrientes de coquetéis vegetais para utilização no semiárido brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, vol. 42, n. 3, p. 611-618, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902011000300006>

HAN, M.; OKAMOTO, M.; BEATTY, P. H.; ROTHSTEIN, S. J.; GOOD, A. G. A genética de eficiência do uso do nitrogênio em plantas cultivadas. **Annu. Rev. Genet.** 49, 269–289, 2015.

ISLAM K. R. & WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biol. and Fert. Soils.** 27: 408-416, 1998.

JACKSON, L. E.; CALDERON, F. J.; STEENWERTH, K. L.; SCOW, K. M. & ROLSTON, D. E. Responses of soil microbial processes and community structure to tillage events and implications for soil quality. **Geoderma**, vol. 114, n. 3-4, p. 305-317, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00046-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00046-6)

JASTROW, J. D.; AMONETTE, J. E.; BAILEY, V. L. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. **Climatic Change**, v. 80, p. 5–23, 2007.

JENKINSON, D. S.; LADD, J. N. Biomassa microbiana no solo: medição e volume de negócios. in: Paul E. A & Ladd J. N (Eds) **Soil Biochemistry**, Vol 5 (pp 415–471). Marcel Dekker, Inc. Nova York e Basel, 1981.

JIA, X.; ZHONG, Y.; LIU, J.; ZHU, G.; SHANGGUAN, Z.; & YAN, W. Efeitos do enriquecimento de nitrogênio nas características microbianas do solo: Da biomassa às atividades enzimáticas. **Geoderma**, v. 366, pág. 114256, 2020.

JONES, J. H.; HANDRECK, K. A. Effect of iron and aluminum oxides on silica in solution in soils. *Nature*, London, v.108 p.852-853, 1963.

JUN, F.; YU, G.; QUANJIU, W.; MALHI, S. S.; YANGYANG, L. Mulching effects on water storage in soil and its depletion by alfalfa in the Loess Plateau of northwestern China. **Agric. Water Manag.** 138, 10–16, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.02.018>.

- KADER, M. A. *et al.* Mulching as water-saving technique in dryland agriculture. **Bulletin of the National Research Centre**, v. 43, n. 1, p. 1-6, 2019.
- KAISER, K.; GUGGENBERGER, G. O papel da absorção de MOD para superfícies minerais na preservação da matéria orgânica dos solos. **Org Geochem** 31(7-8):711-725, 2000.
- KALBITZ, K.; SCHWESIG, D.; RETHEMEYER, J.; MATZNER, E. Estabilização da matéria orgânica dissolvida por sorção ao solo mineral. *Soil Biol Biochem* 37(7):1319-133, 2005.
- KARATHANASIS, A D. Clay Minerals: Weathering and Alteration of In: *Encyclopedia of Soil Science*. 2. ed. New York: Taylor and Francis Group, 2006, p 281-285.
- KASSAM, A.; GONZALEZ-SANCHEZ, E.; CARBONELL-BOJOLLO, R. M.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R. (2021). Expansão Global da Agricultura de Conservação para Melhorar a Matéria Orgânica do Solo, a Saúde do Solo, a Produtividade e os Serviços Ecosistêmicos. In: **Matéria Orgânica do Solo e Alimentando o Futuro**. CRC Press, 2021. pág. 91-126.
- KLEBER, M., EUSTERHUES, K., KEILUWEIT, M., MIKUTTA, C., MIKUTTA, R., & NICO, P. S. Mineral-organic associations: Formation, properties, and relevance in soil environments. **Advances in Agronomy**, 130, 1-140, 2015.
- KNICKER, H. Soil organic N-An under-rated player for C sequestration in soils? *Soil Biol. Biochem.*, **Elsevier**, Amsterdam, v. 43, n. 6, p. 1118-1129, 2011.
- KÖHLER, P.; HARTMANN, J.; WOLF-GLADROW, D. A. Potencial de geoengenharia de intemperismo de silicato artificialmente aprimorado de olivina. **Proc. Nacional Acad. ciência. EUA**, 107, 20228-20233, 2010.
- KORDLAGHARI, M. P.; ROWELL, D. L. The role of gypsum in the reactions of phosphate with soils. *Geoderma*, 32, 105-115, 2006.
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLA, A. Análise de silício: solo, planta e fertilizante. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2004. 34 p. (Boletim técnico, 2).
- LAVALLEE, J. M.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; COTRUFO, M. F. Incorporação de 13 C e 15 N derivados da parte aérea versus 15 N em frações de matéria orgânica associada a minerais: resultados de uma incubação de pasta de solo com material vegetal duplamente marcado. **Biogeochemistry**, v. 137, p. 379-393, 2018.
- LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceituando a matéria orgânica do solo em formas particuladas e associadas a minerais para abordar a mudança global no século XXI. **Biologia da mudança global**, v. 26, n. 1, pág. 261-273, 2020.
- LIANG, C.; AMELUNG, W.; LEHMANN, J. & KÄSTNER, M. Avaliação quantitativa da contribuição da necromassa microbiana para a matéria orgânica do solo. **Global Change Biology**, **25**, 3578 – 3590, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14781>
- LIMA FILHO, O. F.; LIMA, M. T. G.; TSAI, S. **Silício na agricultura**. *Informações Agronômicas*, n. 87, p. 1-7, 1999.
- MA, S., CHEN, G., DU, E., TIAN, D., XING, A., SHEN, H., ... & FANG, J. Efeitos da adição de nitrogênio nos resíduos microbianos e sua contribuição para o carbono orgânico do solo nas florestas da China, da zona tropical à boreal. **Environment pollution**, v. 268, p. 115941, 2021.

MA, S.; CHEN, G.; TIAN, D.; DU, E.; XIAO, W.; JIANG, L.; ZHOU, Z.; ZHU, J.; HE, H.; ZHU, B.; FANG, J. Efeitos das adições de nitrogênio e fósforo de sete anos nas estruturas e resíduos da comunidade microbiana do solo em uma floresta tropical na ilha de Hainan, China. **Geoderma** 361, 114034, 2020.

MANZONI, S.; TAYLOR, P.; RICHTER, A.; PORPORATO, A. & ÅGREN, G. I. **Controles ambientais e estequiométricos na eficiência microbiana do uso de carbono em solos**. *Novo Fitol.* 196, 79–91, 2012. doi: 10.1111/j.1469-8137.2012.04225.x

MATICHENKOV V. V.; CALVERT, D. V. Silicon as a beneficial element for sugarcane. *Journal American Society of Sugarcane Technologists*, Baton Rouge, v 22, p. 21-30, 2002.

MERCANTE, F. M.; FABRICIO, A. C.; MACHADO, L. A. Z. & SILVA, W. M. **Parâmetros Microbiológicos Como Indicadores de Qualidade do Solo sob Sistemas Integrados de Produção Agropecuária**. Dourados, Embrapa Agropecuária Oeste, 27 p, 2004.

MEYER, J. H; KEEPING, M. G. Past, present and future research of the role silicon for sugarcane in southern Africa. In: DATNOFF, LE, SNYDER, GH, KORNDORFER, G.H. *Silicon in Agriculture*. Elsevier: Amsterdam, 2001. p.257-274.

MINICK, K. J.; FISK, M. C.; GROFFMAN, P. M. Soil Ca altera processos que contribuem para a retenção de C e N no horizonte Oa/A de uma floresta folhosa do Norte. **Biogeoquímica** 132:343–357, 2017.

MOORE, T.R.; TURUNEN, J. Carbon accumulation and storage in mineral subsoil beneath peat. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 2004, 68, 690–696.

MOURA, E. G. **Entre a Agricultura e a Ecologia, uma interface por onde transita a emancipação dos agricultores do trópico úmido**. São Luís: UEMA, cap. 6 e 7, p. 63-97, 2020.

MOURA, E. G. *et al.* Management of a cohesive tropical soil to enhance rootability and increase the efficiency of nitrogen and potassium use. **Soil Use and Management**, v. 28, n. September, p. 370–377, 2012.

MOURA, E. G.; PORTELA, S. B.; MACEDO, V. R. A.; SENA, V. G. L.; SOUSA, C. C. M.; AGUIAR, A. D. C. F. Gypsum and legume residue as a strategy to improve soil conditions in sustainability of agrosystems of the humid tropics. **Sustainability**, v. 10, n. 4, p. 1006, 2018.

MOURA, E. G.; SOUSA, R. M.; CAMPOS, L. S.; CARDOSO-SILVA, A. J.; MOONEY, S. J.; AGUIAR, A. D. 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.

NASCIMENTO, C. W. A. do; CUNHA, K. P. V. RODRIGUES. F. A. Silicon and plant tolerance to heavy metals and diseases. In RIBEIRO, M. R. *Topics in soil science*. Viçosa Brazilian Society of Soil Sciences, 2009, v.6, p. 273-318.

ODUM, E. P. A Estratégia de Desenvolvimento do Ecossistema: Uma compreensão da sucessão ecológica fornece uma base para resolver o conflito do homem com a natureza. **ciência**, v. 164, n. 3877, pág. 262-270, 1969.

OLIVEIRA, E. L. *et al.* Avaliação da eficiência agronômica dos fosfatos naturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, cidade, v. 8, p. 63-67, 1984.

- QUESADA, C. A.; PAZ, C.; OBLITAS, E. M.; PHILLIPS, O. L.; SAIZ, G.; LLOYD, J. **Variations in soil chemical and physical properties explain basin-wide Amazon forest soil carbon concentrations** *Soil*, v. 6, p. 53–88, 2020. <https://doi.org/10.5194/soil-6-53-2020>.
- RAIESI, F. Propriedades do solo e efeitos da aplicação de N nas atividades microbianas em dois invernos sistemas de cultivo de trigo. **Biol. Fértil. Solos**, 40: 88-92, 2004.
- RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plant *Biological Reviews*, Cambridge, v.58, n.2, p.179-207,1983.
- ROWLEY, M. C.; GRAND, S.; VERRECCHIA, É. P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. **Biogeochemistry**, v. 137, n. 1-2, p. 27-49, 2018.
- SANTOS, G. A.; SILVA, L.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.) **Fundamentos da matéria orgânica no solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008.
- SANTOS, G. G., SILVEIRA, P. M. D., MARCHÃO, R. L., PETTER, F. A., & BECQUER, T. Atributos químicos e estabilidade de agregados sob diferentes culturas de cobertura em Latossolo do cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 1171-1178, 2012.
- 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**, v. 11, n. 2, p. e03028, 2020.
- SILVA, E.C. *et al.* Adubação verde como fonte de nutrientes às culturas. In: LIMA FILHO, O. F. *et al.* Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática. 1.ed. Brasília: Embrapa. p.267-305, 2014.
- SOIL, Survey Staff. Keys to soil taxonomy. **Washington: Natural Resources Conservation Service and Agriculture Department**, 2014.
- SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B. A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, v. 74, n. 1-2, p. 65-105, 1996.
- SONG, Z.; LIU, C.; MÜLLER, K.; YANG, X.; WU, Y. & WANG, H. Silicon regulation of soil organic carbon stabilization and its potential to mitigate climate change. **Earth-Science Reviews**, v. 185, p. 463-475, 2018.
- SOONG, JL, FUCHSLUEGER, L., MARAÑÓN-JIMENEZ, S., TORN, MS, JANSSENS, IA, PENUELAS, J., & RICHTER, A. Limitação do carbono microbiano: a necessidade de integrar microrganismos em nossa compreensão do ciclo do carbono do ecossistema. **Biologia da mudança global**, v. 26, n. 4, pág. 1953-1961, 2020.
- SPARKS, D.L.; PAGA, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T. & SUMMER, M.E., eds. Methods of soil analysis: Chemical methods. Part 3. Madison, **Soil Science Society of America**, 1996. p.961-1010.
- SPARLING, G. P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Australian Journal Soil research**, Victoria, n. 30, p. 195-207, 1992.

- SPARLING, G. P.; WEST, A. W. A direct extraction method to estimate soil microbial-C calibration in situ using microbial respiration and ¹⁴C-labeled cells. *Soil Biol Biochem.* 1988; 20:337-43.
- SPOSITO, G. A química dos solos. Universidade de Oxford. Imprensa, Oxford, 2008.
- SUTTON, R.; SPOSITO, G.; DIALLO, M.S.; SCHULTEN, H.R. Molecular simulação de um modelo de matéria orgânica dissolvida. **Environ Toxicol Chem** 24(8):1902–191, 2005.
- TANG, B., ROCCI, KS, LEHMANN, A., & RILLIG, MC. O nitrogênio aumenta o acúmulo de carbono orgânico no solo e altera sua funcionalidade. **Biologia da Mudança Global**, 2023.
- TANG, W.; CHEN, D.; PHILLIPS, O.L.; LIU, X.; ZHOU, Z.; LI, Y.; XI, D.; ZHU, F.; FANG, J.; ZHANG, L.; LIN, M.; WU, J.; FANG, Y. Efeitos do aumento da deposição de N a longo prazo no N do solo da floresta tropical montana e n₂O emissões. *Bio do Solo. Bioquim.* 126, 194e203, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.08.027>.
- TEIXEIRA P.C.; DONAGEMMA G.K.; FONTANA A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de análises de métodos de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, Embrapa: 573 p. 2017.
- TIAN, D., NIU, S. Uma análise global da acidificação do solo causada pela adição de nitrogênio. *Cartas de Pesquisa Ambiental* 10 024019, 2015.
- TOTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In ALVAREZ, V H., SCHAEFER, C. E. GR., BARROS, N. F MELLO, J. W. V., COSTA, L M. (Ed.). Tópicos em ciência do solo Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 2, p 195-276, 2002.
- TRESEDER, K.K. Adições de nitrogênio e biomassa microbiana: uma meta-análise de ecoestudos do sistema. **Ecology Letters** 11, 1111–1120, 2008.
- TSONKONVA, P. *et al.* Ecological benefits provided by alley cropping systems for production of woody biomass in the temperate region: a review. **Agroforestry Systems**, v. 85, n. 1, p. 133-152, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9494-8>
- UTIN, U. E. Vulnerabilidade do Capital Natural dos Solos Tropicais à Degradação Induzida pelo Cultivo: Uma Revisão. **IN: Ayandele, IA**, p. 65-76, 2023.
- VITOUSEK, P. & HOWARTH, R. Limitação de nitrogênio em terra e no mar: como pode ocorrer? **Biogeochemistry**, 13, 87 – 115, 1991.
- WANG, C., LU, X., MORI, T., MAO, Q., ZHOU, K., ZHOU, G., NIE, Y., MO, J. Respostas da comunidade microbiana do solo a adições experimentais contínuas de nitrogênio por 13 anos em uma floresta tropical rica em nitrogênio. *Bio do Solo. Bioquim.* 121, 103 e 112, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.03.009>.
- WARDLE, D. A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. **Biol. Rev.** 67, pp. 321-358, 1992.
- WARDLE, D. A.; GHANI, A. A. Uma crítica do quociente metabólico microbiano como bioindicador de perturbação e desenvolvimento do ecossistema, **Soil Biol. Bioquim.** Vol. 27, nº 12, pp. 1601-1610, 1995.
- WHITTINGHILL, K. A. & HOBBIE, S. E. Efeitos do pH e do cálcio na dinâmica da matéria orgânica do solo na tundra do Alasca. **Biogeochemistry**, v. 111, p. 569-581, 2012.

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

WUTKE, E.B.; CALEGARI, A. & WILDNER, L.P. Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para seu uso. *In*: Lima Filho, O.F.L.; Ambrosano, E.J.; Rossi, F. & Carlos, J.A.D.C. (Eds) – **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil**. Brasília, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, p. 59-168, 2014.

ZHANG, T. A.; CHEN, H. Y. & RUAN, H. Efeitos negativos globais da deposição de nitrogênio nos micróbios do solo. **A revista ISME**, v. 12, n. 7, pág. 1817-1825, 2018.

ZHANG, W., CUI, Y., LU, X., BAI, E., HE, H., XIE, H., LIANG, C., ZHANG, X. Alta deposição de nitrogênio diminui a contribuição de resíduos fúngicos para os reservatórios de carbono do solo em um ecossistema de floresta tropical. **Bio do Solo. Bioquim.** 97, 211 e 214, 2016. [https:// doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.03.019](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.03.019).

ZHOU, Z.; WANG, C.; ZHENG, M.; JIANG, L.; LUO, Y. Padrões e mecanismos de respostas das comunidades microbianas do solo à adição de nitrogênio. *Soil Biology and Biochemistry* 115, 433–441, 2017.