

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Meio-Norte
Ministério da Agricultura e Pecuária*

SAÚDE DO SOLO

EM AGROECOSSISTEMAS DA ZONA DE
TRANSIÇÃO CERRADO-CAATINGA

*Luiz Fernando Carvalho Leite
Henrique Antunes de Souza*

Editores técnicos

Embrapa
Brasília, DF
2026

Embrapa

Parque Estação Biológica
Av. W3 Norte (final)
70770-901 Brasília, DF
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Responsável pelo conteúdo e editoração

Embrapa Meio-Norte
Av. Duque de Caxias, 5.650, Bairro Buenos Aires
Caixa Postal 01, 64008-780 Teresina, PI
www.embrapa.br/meio-norte

Comitê Local de Publicações

Presidente: *José Almeida Pereira*

Secretária-executiva: *Edna Maria Sousa Lima*

Membros: *Orlane da Silva Maia, Maria Eugênia Ribeiro, Kaesel Jackson Damasceno e Silva, Ligia Maria Rolim Bandeira, Alexandre Kemenes, Ana Lúcia Horta Barreto, Carlos Antônio Ferreira de Sousa, Carlos César Pereira Nogueira, Francisco de Brito Melo, Ricardo Montalvan Del Aguila, Robério dos Santos Sobreira, Sérgio Luiz de Oliveira Vilela e Valdemir Queiroz de Oliveira*

Edição executiva: *Ligia Maria Rolim Bandeira*

Revisão de texto: *Francisco de Assis David da Silva*

Foto da capa: *Luiz Fernando Carvalho Leite*

Diagramação: *Jorimá Marques Ferreira*

1ª edição

Publicação digital (2026): PDF

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

Embrapa Meio-Norte

Saúde do solo em agroecossistemas da zona de transição Cerrado-Caatinga / Luiz Fernando Carvalho Leite, Henrique Antunes de Souza, editores técnicos. – Brasília, DF : Embrapa, 2026.
PDF (365 p.) : il. color.

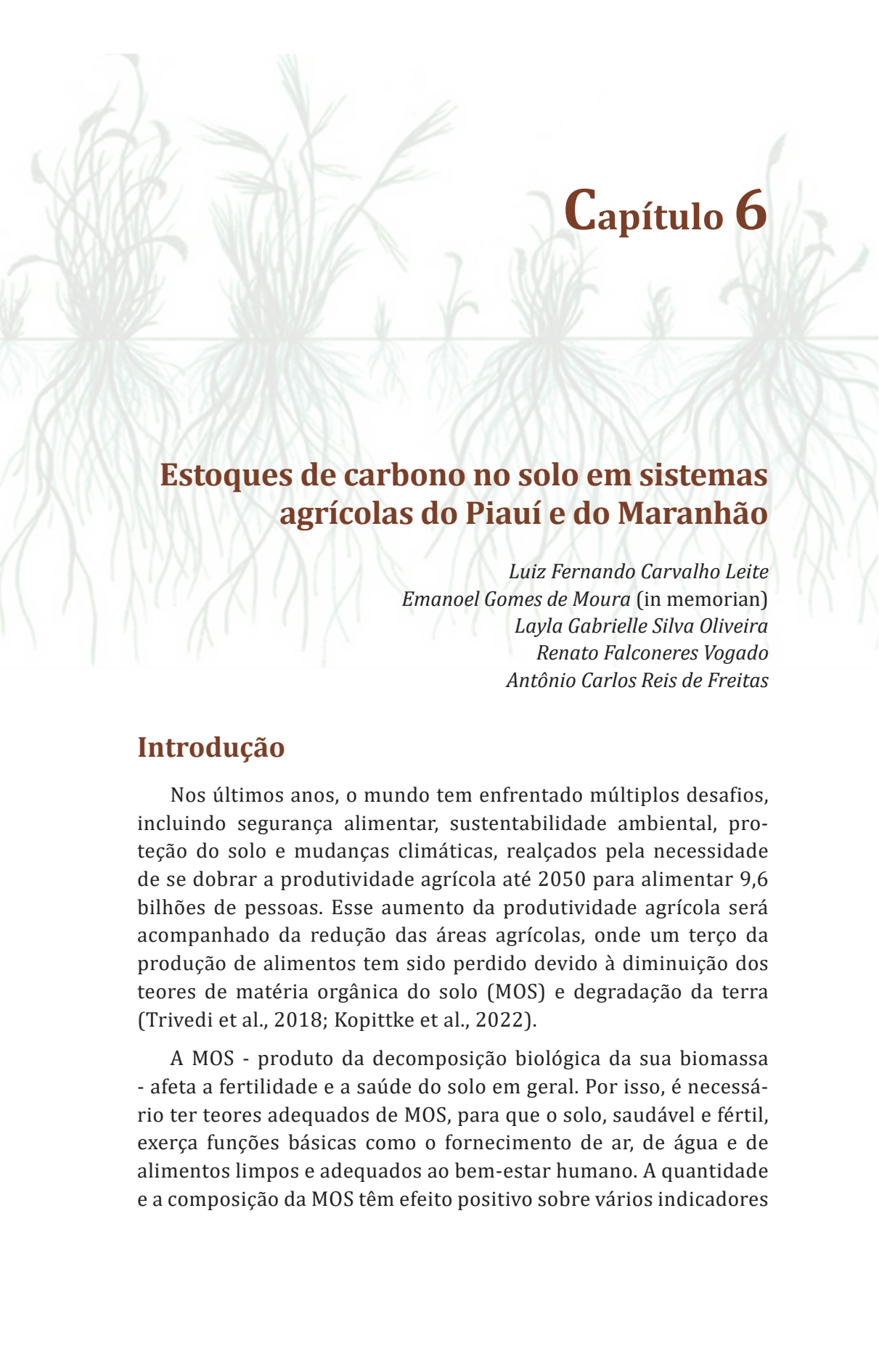
ISBN 978-65-5467-171-2

1. Agricultura Sustentável. 2. Tratamento do Solo 3. Manejo do Solo 4. Agroecossistema. 5. Cerrado. 6. Caatinga. I. Leite, Luiz Fernando Carvalho. II. Souza, Henrique Antunes de. III. Embrapa Meio-Norte.

CDD (21. ed.) 631.45

Orlane da Silva Maia (CRB-3/915)

© 2026 Embrapa



Capítulo 6

Estoques de carbono no solo em sistemas agrícolas do Piauí e do Maranhão

Luiz Fernando Carvalho Leite

Emanoel Gomes de Moura (in memorian)

Layla Gabrielle Silva Oliveira

Renato Falconeres Vogado

Antônio Carlos Reis de Freitas

Introdução

Nos últimos anos, o mundo tem enfrentado múltiplos desafios, incluindo segurança alimentar, sustentabilidade ambiental, proteção do solo e mudanças climáticas, realçados pela necessidade de se dobrar a produtividade agrícola até 2050 para alimentar 9,6 bilhões de pessoas. Esse aumento da produtividade agrícola será acompanhado da redução das áreas agrícolas, onde um terço da produção de alimentos tem sido perdido devido à diminuição dos teores de matéria orgânica do solo (MOS) e degradação da terra (Trivedi et al., 2018; Kopittke et al., 2022).

A MOS - produto da decomposição biológica da sua biomassa - afeta a fertilidade e a saúde do solo em geral. Por isso, é necessário ter teores adequados de MOS, para que o solo, saudável e fértil, exerça funções básicas como o fornecimento de ar, de água e de alimentos limpos e adequados ao bem-estar humano. A quantidade e a composição da MOS têm efeito positivo sobre vários indicadores

que estão relacionados a essas funções: a estrutura e a porosidade; a taxa de infiltração e armazenamento de água; a capacidade de retenção de umidade; a diversidade e atividade biológica dos organismos do solo; e a disponibilidade de nutrientes vegetais. Entretanto, manter um solo fértil e saudável exige cuidado e esforço dos agricultores porque a agricultura não é uma atividade ambientalmente neutra.

Por definição, a agricultura interfere nos processos naturais essenciais que são responsáveis pela manutenção do equilíbrio ambiental e que sustentam o bem-estar humano. Por exemplo, quando o solo é usado para a produção das culturas sem que a matéria orgânica seja restaurada, o conteúdo e os ciclos de nutrientes são interrompidos, a fertilidade do solo declina, o equilíbrio do agroecossistema é perdido e o bem-estar humano é prejudicado. A história está repleta de casos em que comunidades inteiras entraram em colapso, quando a degradação do solo atingiu níveis insuportáveis para sobrevivência humana. Reconstruir a qualidade e a saúde do solo por meio de práticas agrícolas adequadas pode levar vários anos, especialmente em áreas onde a baixa umidade na estação seca reduz a produção de biomassa e a atividade biológica do solo.

A MOS é composta principalmente de carbono, de hidrogênio e de oxigênio e tem pequenas quantidades de outros elementos, como nitrogênio, fósforo, enxofre, potássio, cálcio e magnésio contidos em resíduos orgânicos. Como é difícil medir a matéria orgânica do solo diretamente, os laboratórios preferem quantificar e relatar o carbono orgânico do solo (COS), que se refere apenas ao componente carbono dos compostos orgânicos. Cerca de 58% da massa de matéria orgânica existe como carbono. Pode-se, então, estimar a porcentagem de MOS a partir da determinação do COS usando o fator de conversão 1,72 (derivado de $100/58$). Então, $MOS (\%) = COS \text{ total } (\%) \times 1,72$. O COS é considerado um indicador-chave para a saúde do solo por causa de suas contribuições para a produção de alimentos, mitigação e adaptação às mudanças climáticas e papel no armazenamento e purificação da água.

Matéria orgânica do solo, conceitos e frações

A matéria orgânica do solo (MOS) pode ser considerada como o somatório de todo material orgânico natural, ou alterado biológica e termicamente, encontrado no solo ou na superfície, independentemente da sua fonte de origem, se é vivo ou morto, ou em estágio de decomposição (Nelson; Baldock, 1999). Deve ser excluída desse somatório a porção das plantas vivas localizadas acima do solo. Também de forma simplificada, os principais componentes e frações da MOS podem ser mais didaticamente divididos como na Figura 1.

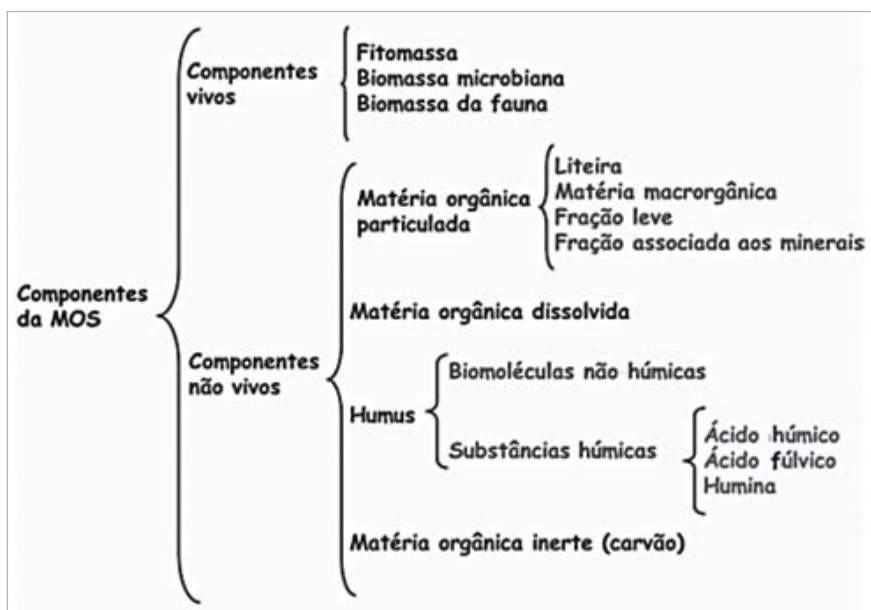


Figura 1. Componentes e frações da matéria orgânica do solo.

Fonte: Adaptado de Nelson e Baldock (1999).

Essas frações da MOS, muito utilizadas como indicadores de qualidade do solo (Leite et al., 2014; Mustafa et al., 2023), apresentam características diferentes entre si, tanto químicas, quanto físicas e morfológicas e, por isso, cada fração tem sua labilidade e seu grau de estabilização. Labilidade e grau de estabilização são fenômenos opostos. 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 ela estará da decomposição.

Neste momento crítico, quando a dinâmica do carbono interpõe vários desafios no horizonte da ciência do solo, adotar uma maneira simples e informativa de conceituar a MOS a partir de suas frações pode ajudar os cientistas do solo a contribuir para a solução de problemas urgentes. Essa nova abordagem deve permitir a compreensão e a previsão do comportamento da MOS nos agrossistemas ao longo do tempo, ao considerar os mecanismos de sua formação, persistência e função no sistema solo. Uma proposta interessante, e que tem sido aceita e adotada pela maioria dos pesquisadores, foi lançada por Lavalley et al. (2019). Os autores propuseram a separação da MOS em matéria orgânica particulada (MOP) e matéria orgânica associada aos minerais (MOAM). Várias evidências corroboram a consideração de que essa abordagem (MOP X MOAM) conduz a uma interpretação simples, bem fundamentada e útil para os cientistas entenderem e preverem a dinâmica da MOS em larga escala e no contexto dos desafios da mudança climática global, onde o carbono exerce influência crítica.

De modo geral, a MOP é, em grande parte, composta de fragmentos leves que são relativamente não decompostos, enquanto a MOAM consiste em moléculas únicas ou fragmentos microscópicos de material orgânico que foram derivados diretamente do material vegetal ou foram quimicamente transformados pela biota do solo. A diferença entre eles é que a MOAM é protegida da decomposição por meio da associação com os minerais do solo, enquanto a MOP não o é. Associações minerais que originam a MOAM incluem ligações químicas entre MOS e superfícies minerais e oclusão dentro de microporos ou pequenos agregados (<50–63 μm), o que torna essa fração menos acessível aos decompositores e suas enzimas (Totsche et al., 2018). Devido a essa diferença fundamental em seus níveis de proteção contra a decomposição, a MOAM tende a persistir por muito mais tempo no solo do que a MOP (Poeplau et al., 2018). 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 quantidade e a proporção de frações estáveis (MOAM), maior a capacidade de o solo suportar cultivos sucessivos. O manejo do solo interfere não apenas no conteúdo de MOS, mas também altera a proporção de MOAM/MOP. Por essa razão, pode-se utilizar a proporção

das frações de matéria orgânica como indicadora da mudança de manejo do solo, para pior ou para melhor, a fim de definir estratégias de utilização tendo em vista a sustentabilidade (Salton et al., 2011; Rocci et al., 2021).

Funções e importância da matéria orgânica para o manejo dos solos nos trópicos

Em muitas regiões tropicais, a sustentabilidade e a viabilidade dos agroecossistemas dependem predominantemente de um equilíbrio entre a entrada/saída de matéria orgânica do solo e a manutenção de uma soma adequada de cátions básicos (SCB) na zona de crescimento das raízes (Quesada et al., 2020). Nessa região, a degradação da terra ocorre quando o manejo do solo não pode superar as forças naturais que diminuem o teor de MOS devido à sua rápida decomposição e reduzem o teor de cátions básicos devido à intensa lixiviação (Ramos et al., 2018). Além disso, a maioria dos solos nessa região apresenta baixa resiliência intrínseca à degradação física, devido ao baixo conteúdo de elementos agregadores, como carbono, cálcio e ferro elementar no solo (Moura et al., 2018). Nas condições naturais da região centro-norte maranhense, por exemplo, o sistema solo-vegetação é resiliente à degradação, como consequência da cobertura completa da superfície do solo pela floresta secundária, combinada com a alta atividade da fauna do solo (Ciemer et al., 2019).

Infelizmente, o uso contínuo da área cultivada nessa região, sem esgotamento da fertilidade, é uma tarefa difícil, pois depende fortemente do acúmulo e da estabilização de matéria orgânica do solo, do aumento da retenção de cátions básicos na zona radicular e das melhorias na estrutura do solo (Kannan et al., 2020). Portanto, para atender às expectativas de sustentabilidade do solo e para substituir a agricultura itinerante nos trópicos por sistemas mais sustentáveis, as estratégias adotadas devem ir além do aumento na produtividade das culturas; elas devem incluir procedimentos de gerenciamento que possam melhorar e manter a fertilidade do solo ao longo do tempo. Quando as áreas com vegetação natural são alteradas para implantação da agricultura, há intensas mudanças na dinâmica do C do

solo (Figura 2). Em geral, com o manejo convencional, ocorre a perda de carbono do solo e a degradação da terra. A partir das mudanças para manejos alternativos e sustentáveis, inicia-se a recuperação do carbono do solo. Todas as fases são determinadas pela relação entre a produção e a decomposição da biomassa P/D. Em adição, como o COS é altamente dinâmico, qualquer ação provocada pelo homem, e que promova diminuição da quantidade de C que entra (inputs) no solo ou aumento da quantidade que é perdida (outputs), resulta em incremento acentuado nas concentrações atmosféricas de CO_2 (Koppitke et al., 2017).

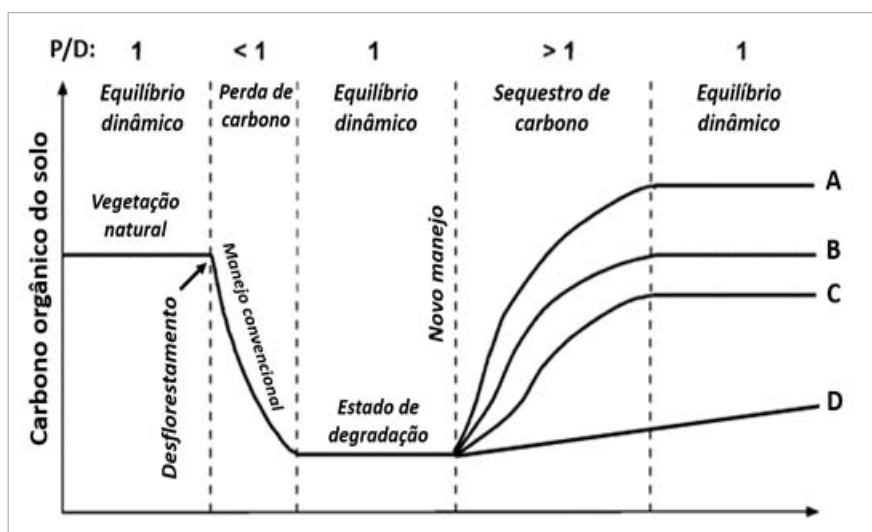


Figura 2. Dinâmica do carbono do solo nos ecossistemas.

No início, vegetação natural, então submetida ao manejo convencional e perda drástica de carbono. Depois, com várias alternativas de manejo: (A) Biomassa de árvores de leguminosas de alta qualidade mais cálcio; (B) Biomassa de árvores de leguminosas de baixa qualidade mais cálcio; (C) Biomassa de árvores de leguminosas de baixa qualidade; e (D) Área sob regeneração natural. P/D = relação produção/decomposição de MOS.

Fonte: Adaptado de Johnson (1995).

Assim, o grande desafio é identificar, para cada situação específica, as práticas de manejo do solo que mantenham e até aumentem a quantidade e a estabilização da MOS, a fim de garantir a produtividade e a lucratividade dos agricultores no mais curto prazo possível.

Essa necessidade é reconhecida por meio de programas como o 4 por Mil, que pretende incentivar a introdução de práticas sustentáveis com meta para aumentar os estoques globais de COS em 0,4% (4 por 1.000) por ano (Rumpel et al., 2022).

Mecanismos reguladores e estratégias para o aumento da estabilização e do acúmulo da matéria orgânica no solo

Embora seja absolutamente desejável, só será possível aumentar e manter níveis adequados de MOS, se for levada em conta a interação entre os processos que promovem a decomposição e a estabilização da MOS derivada da biomassa aplicada à superfície. Então, a taxa de armazenamento de carbono no solo é controlada principalmente por dois fatores fundamentais: a) produção primária líquida de biomassa (sua quantidade e qualidade); e b) a taxa de decomposição e transformação da biomassa aplicada ao solo. A decomposição da biomassa natural em solos é, principalmente, mediada pela comunidade microbiana, com cerca de 10–15% da energia resultante utilizada pelos organismos do solo. A oxidação química abiótica é provavelmente responsável por menos de 5% da decomposição da MOS (Lützow et al., 2006).

No inverso da decomposição, o termo abrangente “estabilização” da MOS é utilizado para processos ou mecanismos que levam a rotatividade mais prolongada da MOS. Por isso, a estabilização é definida como proteção da MOS contra a decomposição, por meio do efeito integrado de três fatores: a) recalcitrância; b) interações organominais; e c) inacessibilidade. O tempo de rotatividade da MOS estabilizada não pode ser dado como valor absoluto, porque é dependente das condições do ambiente e das propriedades do solo. Tanto do ponto de vista da perspectiva do sequestro de carbono, quanto da sustentabilidade do uso do solo, a estabilização da MOS é uma ferramenta valiosa, que pode contribuir decisivamente para diminuir a concentração de CO₂ da atmosfera, mudar a aptidão das terras e emancipar os agricultores do trópico úmido (Lützow et al., 2006).

Os mecanismos de estabilização da MOS foram primeiramente diferenciados assim por Sollins et al. (1996): a) preservação seletiva: esse mecanismo leva ao acúmulo relativo de moléculas recalcitrantes (com capacidade de resistir). Geralmente, duas recalcitrâncias são consideradas: a recalcitrância primária, que é a recalcitrância da biomassa e dos rizodepósitos, e a recalcitrância secundária, que inclui a recalcitrância de produtos microbianos, produtos húmicos, polímeros e carvão vegetal. b) inacessibilidade espacial: deriva da localização espacial da MOS que influencia o acesso por micróbios e enzimas. A inacessibilidade é causada pela oclusão da MOS dentro dos agregados, intercalação dentro de filossilicatos, hidrofobicidade e encapsulação em macromoléculas orgânicas; e c) interações com superfícies e íons metálicos: são interações intermoleculares entre a MOS e quaisquer outros componentes inorgânicos do solo que alteram a taxa de decomposição. Essas interações incluem troca de ligante, pontes catiônicas polivalentes, interações fracas e interação de íons metálicos com substâncias orgânicas (complexação). Mais recentemente, baseados nos mesmos princípios, Rowley et al. (2018) propuseram originalmente três mecanismos teóricos que conferem estabilidade da MOS: a) uma recalcitrância inerente ou estabilidade termodinâmica da MOS e sua subsequente preservação seletiva por decompositores (relacionado à qualidade da biomassa); b) oclusão física (normalmente intra-agregados) e proteção da MOS contra os decompositores; e c) sorção da MOS por componentes inorgânicos do solo (cátions polivalentes), resultando em complexos organominerais ou organocátions.

Alguns autores, como Castellano et al. (2015), dividiram a fração estável em dois compartimentos que são conhecidos por exibirem comportamento de saturação no solo: a) associado aos minerais; e b) ocluído nos microagregados. Consistente com a teoria da saturação hierárquica do carbono descrita por Kool et al. (2007), o compartimento associado ao mineral é maior e satura antes do ocluído por microagregados. Nesse modelo, a fração da MOS não protegida e, portanto, não estável, inclui frações de carbono orgânico particulado que não são obstruídas dentro de microagregados e são definidas operacionalmente como MOP porque são < 2 mm. Há evidências de que a fração não protegida (< 2 mm) aumenta linearmente com en-

tradas de carbono (Brown et al., 2014). As proporções hipotéticas entre essas frações de MOS com um nível de saturação teórico para uma situação de equilíbrio dinâmico (entrada = saída > 0) estão na Figura 3.

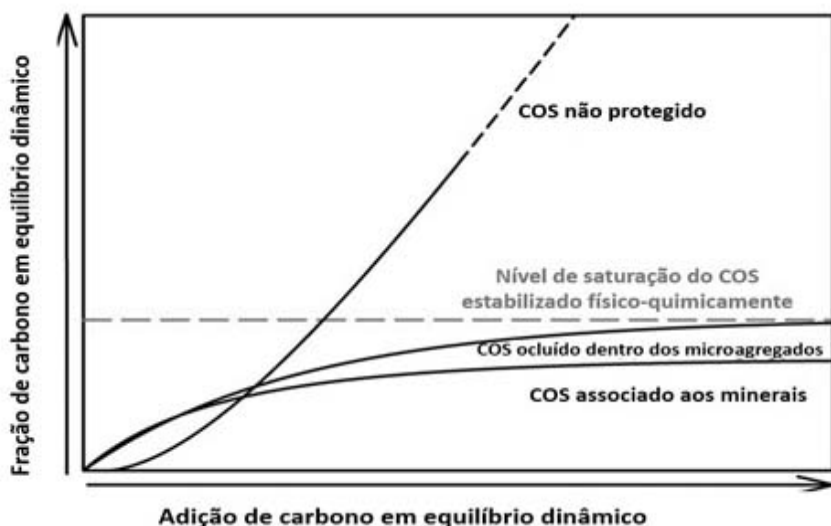


Figura 3. Relações teóricas do equilíbrio dinâmico entre o carbono (C) aplicado, as frações do carbono orgânico do solo (COS) física e quimicamente estabilizadas e a fração COS não protegida.

Fonte: Adaptado de Castellano et al. (2015).

Vários pesquisadores propuseram que a capacidade do solo para sequestrar carbono (ou o seu nível de saturação de MOS) não está baseada apenas no produto químico da associação dos compostos de carbono com as partículas de silte e de argila. Por exemplo, Baldock e Skjemstad (2000) propuseram que cada matriz mineral (tipo de solo) tem uma capacidade única de estabilizar o carbono orgânico. Isso não depende apenas da presença de superfícies naturais capazes de adsorver materiais orgânicos (uma capacidade de proteção), mas também da natureza química da fração mineral do solo, da presença de cátions polivalentes e da arquitetura da matriz do solo.

Anteriormente, acreditava-se que o mecanismo principal por trás da persistência da MOS seria a preservação seletiva por decompositores de substratos termodinamicamente estáveis ou recalcitrantes, causando seu acúmulo na matriz do solo. Atualmente, tem sido cada

vez mais aceita a hipótese de Oades (1988), segundo a qual há poucas evidências da preservação de materiais complexos da parede celular, como lignina e suberina, em compartimentos de MOS estáveis. Ao contrário, em alguns estudos, tem sido reportado que a preservação apenas é relevante no início do continuum de decomposição da MOS (Kleber et al., 2015) ou dentro de horizontes orgânicos (Preston et al., 2009). A estabilização e manutenção da MOS em horizontes de solo mineral em períodos de médio a longo prazo é agora predominantemente considerada como sendo conduzida por propriedades do ecossistema e não pela recalcitrância inerente da MOS (Schmidt et al., 2011).

Infelizmente, o entendimento dos mecanismos que determinam a persistência e a estabilização do carbono do solo ainda é limitado, o que reduz a capacidade de prever as mudanças nos estoques das frações de MOS e sua resposta à adição de biomassa. Prever a estabilidade em longo prazo de compostos de carbono no solo permanece difícil devido à grande variedade de processos que controlam a rotatividade da matéria orgânica no solo, incluindo a química do carbono e sua interação com sistemas de enzimas microbianas, superfícies minerais, temperatura e umidade do solo (Błonska et al., 2019). Além disso, estudos de carbono do solo também são dificultados porque as técnicas utilizadas para avaliar solos geralmente influenciam os resultados. No entanto, tentativas recentes de desvendar os processos de decomposição/estabilização da MOS derivada da biomassa aplicada têm sugerido que: a) a biomassa de baixa qualidade é pouco preservada seletivamente na MOS físico-quimicamente estabilizada; b) a MOS com maior estabilidade físico-química é derivada da necromassa microbiana; c) a quantidade de biomassa, em vez da qualidade, é o principal determinante da quantidade de MOS físico-quimicamente estabilizada; d) as reações abióticas de condensação são contribuintes menores para a estabilização da MOS; e e) os fatores ambientais e biológicos, como disponibilidade de cátions polivalentes e de nitrogênio no solo, dominam a estabilização da MOS mais do que a estrutura molecular ou composição elementar da biomassa (Dungait et al., 2012). Considerando-se todos os aspectos teóricos sobre os mecanismos que governam o acúmulo de COS reportados na literatura científica, já aqui parcialmente descritos, pode-se concluir que são as seguintes as práticas capazes de contribuir para acumulação e estabilização da MOS:

- a) Uso de biomassa de alta qualidade como cobertura morta.
- b) Aumento dos teores de cálcio no solo (cátion polivalente).
- c) Aplicação de fertilizantes nitrogenados.
- d) Plantio direto (sem revolvimento do solo) com cobertura morta.

Detalhes sobre cada uma dessas quatro práticas merecem ser discutidos separadamente:

a) A qualidade da biomassa vegetal como fonte da estabilização da MOS

A principal fonte de carbono do solo é a biomassa vegetal. Os processos de decomposição da biomassa e da estabilização da MOS foram quase sempre considerados separados pelos estudiosos do uso de biomassa para aumentar a MOS (Sollins et al., 2007). A pesquisa de decomposição da biomassa se concentrou nos efeitos da qualidade da biomassa na mineralização em curto prazo e na liberação de nutrientes (Parton et al., 2007), enquanto a pesquisa de estabilização da MOS concentrou-se em interações e processos que aumentam a estabilidade da MOS total, devido à proteção físico-química contra a atuação dos organismos decompositores (Lützow et al., 2008). Mais recentemente, predomina o consenso de que, para melhor entender e gerenciar a resposta da MOS às mudanças ambientais globais, a decomposição da biomassa e a estabilização da MOS devem ser estudadas de forma integrada (Dungait et al., 2012).

A decomposição da biomassa é um processo pelo qual parte da energia e dos nutrientes é transferida da biomassa do solo para vários grupos de organismos decompositores (Whalen; Sampedro, 2009). A fauna de maior tamanho (mesofauna e macrofauna) acelera as taxas de decomposição com seu trabalho em conjunto com a fauna de menor tamanho (microfauna) e com os microrganismos (Simpson et al., 2012). A fauna detritívora maior contribui diretamente para a decomposição por meio da trituração da biomassa em pedaços menores, o que abre novas superfícies para o ataque microbiano. Além da presença e atuação dos decompositores, a qualidade ou composição química da biomassa é outro importante fator de controle da decomposição. Na verdade, as forças que determinam a decomposição derivam das interações entre decompositores X qualidade química da biomassa.

As variáveis de qualidade química da biomassa, que têm sido utilizadas como indicadores robustos para determinar a sua taxa de decomposição são: os conteúdos de carbono (C) e de nitrogênio (N), a relação C/N e os teores de lignina e de polifenóis. Nos últimos anos, foi proposto que a celulose fosse incluída como outra variável de qualidade química relativa à decomposição. Para classificar a qualidade de várias biomassas utilizadas em um experimento sobre estabilização de MOS, Puttaso et al. (2013) utilizaram vários indicadores de qualidade (Tabela 1).

As taxas de decomposição de biomassa são explicadas principalmente pela relação C/N, conteúdos de lignina e polifenol. Levando isso em conta, Tian et al. (1993) definiram um índice de qualidade da biomassa de plantas (IQBP) matematicamente descrito como:

$$IQBP = [1 / (0,423C / N + 0,439\text{lignina} + 0,138\text{polifenóis})] \times 100$$

A Tabela 2 apresenta uma lista de biomassas de seis espécies de plantas utilizadas na região tropical, com os respectivos índices de qualidade calculados pela equação do IQBP. A qualidade da biomassa tem grande variabilidade indicada pelos valores do IQBP, que variam desde 4,7 para palhada de milho até 14,1 para folhas de leucena. As biomassas das culturas apresentam IQBP menor que o das espécies herbá-

Tabela 1. Características de qualidade química de biomassas vegetais do nordeste da Tailândia

Biomassa	C	N	Relação C/N	Lignina (L)	Relação L/N	Polifenol (Pf)	Relação Pf / N	Celulose
Amendoim	388	22,8	17,1	67,6	2,96	12,9	0,6	178
Tamarindo	427	13,6	31,5	87,7	31,5	31,5	2,3	143
Arroz	367	4,7	78,4	28,7	6,5	6,5	1,4	507
Dipterocarpus	453	5,7	79,5	175,5	64,9	64,9	11,4	306

Fonte: Adaptado de Puttaso et al. (2013).

ceas e lenhosas em sua maioria. Folhas de espécies lenhosas sempre apresentam IQBP mais alto do que de galhos da mesma espécie. A qualidade da biomassa, e principalmente a proporção da quantidade de carbono em relação à quantidade de nitrogênio, influencia a taxa de decomposição e a disponibilidade dos nutrientes liberados da biomassa em decomposição. Essa proporção, geralmente referida como relação C/N, pode apresentar grande variação, como se pode verificar na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química e índice de qualidade de biomassas de plantas (IQBP) utilizadas nos trópicos.

Biomassa de plantas	C/N	Lignina (%)	Polifenol (%)	IQBP
Leucena folhas	7,8	7,1	4,90	14,1
Centrosema folhas	8,0	10,1	1,50	12,5
Gliricidia folhas	9,4	8,6	2,12	12,4
Gliricidia galhos	13,1	11,6	1,62	9,2
Mucuna folhas	7,5	16,8	4,00	9,0
Leucena galhos	12,8	13,4	5,02	8,3
Palhada de arroz	42,3	5,2	0,55	4,9
Palhada de milho	42,6	6,8	0,56	4,7

Fonte: Adaptado de Tian et al. (1993).

Em termos gerais, essa relação pode variar de cerca de 15:1 para plantas jovens, 80:1 para a palha das culturas deixadas no campo após a colheita e mais de 100:1 para serragem de madeira. Para comparação, a relação C/N da matéria orgânica estabilizada está geralmente na faixa de 10:1 a 12:1 e a C/N dos microrganismos do solo está em torno de 7:1. A relação C/N das biomassas vegetais é, na verdade, apenas outra maneira de avaliar a porcentagem de nitrogênio. Uma biomassa com C/N alta tem baixa porcentagem de nitrogênio. enquanto uma biomassa de baixa relação C/N tem porcentagens relativamente altas de nitrogênio. As palhadas resultantes da colheita geralmente têm uma média de 40% de carbono, e esse número não muda muito de planta para planta.

Então o valor da relação C/N depende mesmo é do conteúdo de N, que varia muito, dependendo da liberação de nitrogênio, da espécie de planta e de seu estágio de crescimento. Após aplicada ao solo, a biomassa passa a ser decomposta e a disponibilidade de N dela derivada varia com o tempo e com a qualidade da biomassa. Na biomassa de alta relação C/N, o N pode ser totalmente imobilizado pelos microrganismos decompositores que o utilizam para o aumento de sua população, que exige grande quantidade de proteína. Por outro lado, na biomassa de alta qualidade, o N é quase imediatamente mineralizado, ou seja, tornado disponível para absorção pelas plantas.

A qualidade da biomassa, portanto, deve ser a primeira estratégia para aumentar a acumulação e estabilização da MOS. Sabe-se que a intensidade dos mecanismos pelos quais o carbono orgânico pode ser estabilizado biologicamente depende fortemente da estrutura química da biomassa adicionada ao solo (Ellerbrock; Gerke, 2013). Também, Cotrufo et al. (2013) desenvolveram a estrutura de estabilização do que eles chamaram de “matriz de eficiência microbiana do solo” (MEMS). A estrutura MEMS é baseada nos princípios de que a) associação mineral é o meio mais eficaz de estabilização da MOS; e b) a maioria da MOS estabilizada por mineral é de origem microbiana, o que sugere que a qualidade da biomassa pode afetar a taxa de estabilização da MOS, afetando também a biomassa microbiana e o uso de substrato (Cotrufo et al., 2019).

Então, os mecanismos pelos quais a MOS pode ser biologicamente estabilizada dependem da capacidade da biomassa adicionada de aumentar a necromassa microbiana para interagir com o mineral disponível no solo (Buckeridge et al., 2020). Biomassa de plantas que produzem mais necromassa microbiana resulta em mais matéria orgânica que pode ser estabilizada físico-quimicamente. Quando o substrato microbiano (biomassa) usado é de alta qualidade, a razão anabolismo/catabolismo microbiano é alta. Como resultado, mais necromassa microbiana e menos CO₂ são produzidos por quantidade de biomassa metabolizada, e estoques de MOS estáveis são previstos para ser relativamente grandes. Por outro lado, quando a biomassa utilizada é de baixa qualidade, a biomassa microbiana é relativamente baixa e menos necromassa microbiana é produzida por quantidade de biomassa metabolizada. Como resultado, os estoques de MOS estáveis são previstos para ser relativamente pequenos.

Em trabalho de Sena et al. (2020) sobre o aumento da MOS, foram comparadas duas leguminosas de alta qualidade de biomassa (gliricídia e leucena) com duas de baixa qualidade (acácia mangium e sombreiro). Esse experimento foi conduzido em um solo coeso enriquecido com cálcio do município de Brejo, MA (Tabela 3). Além das leguminosas, também foram incluídas uma área de floresta secundária e outra área controle sem biomassa. Depois de 6 anos de aplicação, ambas as frações, carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado ao mineral (COAM), foram aumentadas pelas biomassas de alta qualidade da gliricídia e da leucena em comparação com os outros tratamentos com biomassa de baixa qualidade (acácia e sombreiro) (Tabela 3). Diferenças mais significativas foram observadas na fração COAM quimicamente mais estabilizada. Para as duas frações de carbono orgânico (COP e COAM), não houve diferenças significativas entre as áreas com biomassa de baixa qualidade, controle e floresta secundária. Mesmo na floresta secundária, a quantidade de carbono orgânico total (COT = COAM + COP) foi mais de 60% menor do que em áreas com gliricídia e

Tabela 3. Frações de carbono orgânico do solo em função da aplicação de biomassas de alta e de baixa qualidade.

Tratamento	Acácia	Gliricídia	Leucena	Sombreiro	Controle	Floresta secundária
COP (g/kg)	3,10 b	3,92 a	4,60 a	2,62 b	3,07 b	3,51 b
COAM (g/kg)	7,66 b	12,18 a	11,53 a	9,20 b	8,76 b	7,40 b
COT (Mg/ha)	10,76 b	16,10 a	16,13 a	11,82 b	12,83 b	10,91 b
TCOS (g/kg)	41,96 b	62,79 a	62,90 a	46,09 b	50,04 b	42,55 b

COP = carbono orgânico particulado; COAM = carbono orgânico associado ao mineral; COT = carbono orgânico total; TCOS = total de carbono orgânico sequestrado.

Fonte: Adaptado de Sena et al. (2020).

leucena (biomassa de alta qualidade). O total de carbono orgânico sequestrado (TCOS) nas áreas de gliricídia e de leucena foi de 20 toneladas por hectare maior do que na floresta secundária. Isso significa oportunidade de inclusão do agrossistema num programa de comercialização do crédito carbono.

Em contraste, a biomassa de acácia (baixa qualidade) não aumentou nenhuma fração de carbono orgânico em comparação com a floresta secundária e com a área testemunha. Esses resultados recomendam a biomassa de alta qualidade por sua superioridade para o acúmulo de MOS mais estabilizada em relação às biomassas de baixa qualidade.

b) Aumento dos teores de cátions polivalentes no solo e seu efeito na estabilização da MOS

Dos mecanismos que podem contribuir para a estabilização da MOS, as interações dos compostos derivados da decomposição da biomassa com as superfícies minerais de cátions polivalentes (Ca, Mg, Fe e Si) são os mais eficazes e mais viáveis do ponto de vista prático (Lützow et al., 2006). De fato, esses cátions polivalentes interagem com grupos funcionais de MOS formando pontes de cátions, levando à relativa estabilização de MOS (Moore; Turunen, 2004). As ligações entre cátions polivalentes e grupos funcionais de matéria orgânica carregados negativamente não são facilmente reversíveis, e as superfícies de materiais orgânicos são menos acessíveis à atividade microbiana (Whittinghill; Hobbie, 2012). Por isso, numerosos estudos sobre estabilização de MOS se concentram em interações organominerais que retardam a rotatividade da MOS, devido à proteção físico-química oferecida pela associação mineral contra a atuação dos decompositores (Lützow et al., 2006; Ellerbrock; Gerke, 2018). De fato, a formação de pontes catiônicas de cátions polivalentes (principalmente Ca, Mg, Fe e Si) interagindo com grupos funcionais da MOS, levando a uma estabilização relativa da MOS, tem sido relatada como um mecanismo essencial para aumentar a matéria orgânica estabilizada e reter a base cálcio no perfil do solo (Ellerbrock; Gerke, 2013; Rowley, 2018).

As ligações entre cátions polivalentes e grupos funcionais carregados negativamente de matéria orgânica não são facilmente reversíveis, e as superfícies de materiais orgânicos serão menos acessíveis à atividade microbiana (Liang et al., 2019). Portanto, em solo enriquecido com Ca, via gesso e cal, conforme recomendado por Crusciol et al. (2019), a biomassa de leguminosas também pode reunir uma quantidade considerável de cátions base reciclados, recuperados fora do alcance das lavouras, melhorando o estado químico da zona radicular (Berenguer et al., 2018; Moura et al., 2021).

Outra vantagem desse processo é que, no solo enriquecido com cálcio, por exemplo, o acúmulo de MOS, estabilizada por associação mineral, aumenta a capacidade do solo de reter cátions, melhorando a capacidade de enraizamento do solo e evitando os efeitos adversos da concentração de cátions ácidos na zona radicular (Ramos et al., 2018). Isso significa que, por meio desse processo, a MOS é estabilizada contra as forças de decomposição e os cátions são retidos contra as forças de lixiviação. Juntos, esses processos podem contribuir para evitar a degradação dos solos nas condições do trópico úmido (Sena et al., 2020).

Na última década, as interações positivas entre a MOS e os cátions básicos foram demonstradas como um mecanismo essencial para aumentar a estabilização da matéria orgânica e reter os cátions básicos no perfil do solo (Ellerbrock; Gerke, 2018). As ligações entre cátions polivalentes e grupos funcionais de matéria orgânica com carga negativa são agora bem conhecidas por sua menor acessibilidade à atividade microbiana e, por isso, são mais estáveis (Lützow et al., 2006). Hipóteses formuladas em vários estudos, Hobbie et al. (2002) e Groffman et al. (2006) descobriram que a respiração microbiana é realmente mais baixa em ambientes ricos em Ca, mesmo quando as condições físico-químicas para atividade microbiana são melhoradas.

Além disso, em experimentos de laboratório, observou-se que a concentração de Ca trocável está correlacionada com a redução das perdas de MOS por respiração com a diminuição da emissão de CO₂ durante a incubação (Whittinghill; Hobbie, 2012; Minick et al., 2017). Portanto, o Ca trocável parece estar ligado a uma redução da

propensão para decomposição de substratos de carbono, que não está ligada apenas a seus efeitos sobre a ecologia microbiana, mas também à estrutura supramolecular organo-metal formada pelas interações orgânicos-cátions-orgânicos, como sugerido por Rowley et al. (2018) (Figura 4).

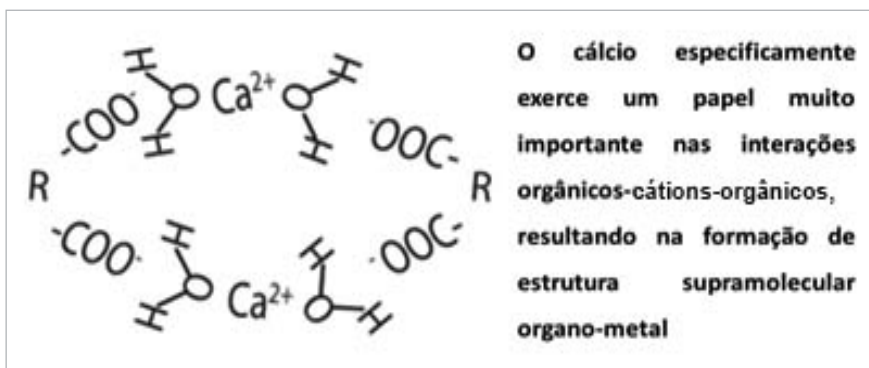


Figura 4. Estrutura supramolecular organo-metal, formada a partir das interações orgânicos-cálcio-orgânicos.

Fonte: Adaptado de Rowley et al. (2018).

Essas estruturas estão, de alguma forma, protegidas contra a oxidação pelos organismos do solo e, por isso, observa-se que em solos ricos em cálcio também são sempre maiores os conteúdos de matéria orgânica.

A forte correlação positiva entre a concentração de cálcio e o conteúdo de MOS encontrada em um complexo húmus-argila confirma a hipótese das interações Ca-MOS que ocorrem no solo (Figura 5A). Também, nos Argissolos do centro-norte do Maranhão, existe forte correlação entre o teor de COAM e os conteúdos de Ca e de Mg, como indicam os resultados de Nascimento (2022). Mais de 71% do COAM pode ser explicado pela disponibilidade de Ca + Mg no solo (Figura 5B)

O conteúdo das frações de carbono influenciado pela aplicação ao solo dos cátions polivalentes Ca e Si em um Argissolo da Formação Itapecuru no MA estão na Tabela 4. A comparação entre dois tratamentos com biomassa [(Ca + Si + L + U) e (L + U)] confirma o efeito do Ca + Si sobre a estabilização da MOS, com aumento de 62% na fração mais estável do carbono (COAM) (17,7 para 25,4) devido ao

efeito dos cátions. Além disso, a superioridade do Si em relação ao Ca se evidencia na diferença de 28% de COAM entre Ca + L contra Si + L (17,8 para 22,8). Essa diferença pode ser explicada pelo maior potencial iônico do silício (9,52 para 1,89), o que favorece a interação com os compostos derivados da biomassa para a estabilização da MOS.

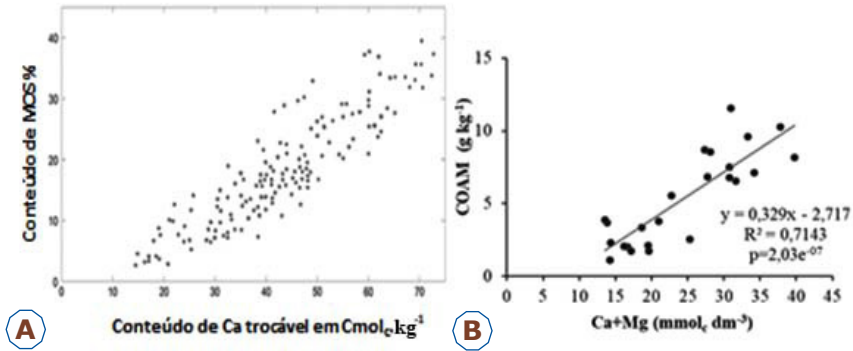


Figura 5. Relação positiva entre (A) cálcio trocável e concentração de carbono orgânico no solo e (B) teor de carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e conteúdo de Ca e Mg no solo.

Fonte: Adaptado de Rowley et al. (2018) e Nascimento (2022).

Tabela 4. Teores de carbono orgânico total (COT), particulado (COP) e associado aos minerais (COAM).

Tratamento	COT	COP	COAM
Ca + Si+ L + U	35,7 a	10,4 a	25,4 a
Si + L	33,1 b	10,3 a	22,8 b
Ca + L + U	31,5 b	9,5 a	21,9 b
Si + L + U	27,0 c	5,9 c	21,0 b
Ca + L	24,7 d	6,8 bc	17,8 c
L + U	22,3 e	6,6 bc	15,7 cd
L	22,3 e	7,5 b	14,8 d
U	20,4 f	3,4 d	16,9 cd
CV	4,5	9,9	7,5

L = biomassa de leguminosa; U = ureia.

Fonte: Adaptado de Gomes (2023).

c) Aplicação de fertilizante nitrogenado

A aplicação de fertilizante nitrogenado associado à biomassa também tem sido relatada como outra estratégia para aumentar o conteúdo de MOS estabilizada, porque aumenta a atividade microbiana (Sarker et al., 2017). Não se pode mais aceitar que a estabilização da matéria orgânica seja dominada pela preservação seletiva de componentes orgânicos recalcitrantes, porque há fortes evidências de que a maior parte da matéria orgânica estável no solo foi microbiologicamente transformada (Prescott, 2010).

A teoria da decomposição estequiométrica prevê que as entradas de nitrogênio no sistema aumentam a atividade microbiana e a transformação da biomassa fresca em necromassa microbiana, passível de estabilização, em associação com os cátions polivalentes (Chen et al., 2014). Isso significa que a alocação e a assimilação de carbono e de nitrogênio são processos acoplados que provavelmente têm efeitos mutualísticos na estabilização da MOS. Por isso, especialmente em solos franco-arenosos como os do Maranhão, que têm poucos mecanismos de proteção física fornecidos pela argila e silte, é mais aceitável que a maioria dos compostos estáveis da MOS tenha sido transformada por meio de atividades biológicas aceleradas pelo nitrogênio, que levam à produção de compostos secundários complexos, associados principalmente ao Ca, que são mais resistentes à decomposição (Grandy; Neff, 2008).

d) Plantio direto e sistemas integrados com cobertura morta e a estabilização da MOS

O plantio direto, sem revolvimento do solo com grade ou arado, tem sido apontado por vários autores como uma prática que favorece o acúmulo de MOS. Nesse sistema, em geral, uma camada de biomassa é aplicada ou deixada à superfície para cobertura do solo. Duas são as principais causas das taxas de redução da decomposição da MOS no plantio direto:

- 1) O estabelecimento de um ambiente menos propício à atividade microbiana na superfície das moléculas de carbono.
- 2) As mudanças na dinâmica de formação e estabilização dos agregados.

Comparado ao sistema convencional, o sistema de plantio direto favorece o ambiente de estabilização da MOS ao diminuir o fluxo de oxigênio e a temperatura do solo, o que limita a degradação oxidativa dos substratos orgânicos e favorece sua estabilização. Em contraposição, no sistema convencional, o preparo do solo, com o seu revolvimento, aumenta a porosidade e o fluxo de oxigênio no interior do solo, o que pode aumentar a oxidação da matéria orgânica. Formada pelos agregados, a estrutura do solo e suas interações são muito influenciadas pelo manejo agrícola, porque o preparo destrói os agregados e o plantio direto contribui para a agregação.

A agregação diminui a mineralização de carbono, porque os compostos de carbono são protegidos dos decompositores no interior dos agregados. Os macroagregados, em particular, são muito suscetíveis à degradação pelo preparo do solo e representam um mecanismo importante para a proteção e manutenção da MOS que pode ser perdida com o preparo. Nesse sentido, Campos et al. (2013), em áreas do Cerrado piauiense, avaliaram os estoques de C e de N e a taxa de emissão ou sequestro de C-CO₂, até 40 cm de profundidade, em Latossolo Amarelo, em plantios direto e convencional, e observaram maiores acúmulos de C nas áreas de plantio direto com maior tempo de adoção (Tabela 5)

Em solos de textura franco-arenosa, como a maioria dos solos do Maranhão, o sistema de plantio direto com cobertura morta promove a formação de agregados, que, mesmo sendo instáveis, contribuem para o crescimento das raízes e para a absorção de nutrientes. Entretanto, como essa é uma condição de baixa resiliência, qualquer perturbação pode provocar a quebra da frágil estrutura dando origem a uma terra “sólada” ou formando um “sôlo” como dizem os agricultores do Maranhão. O “sôlo” é um solo maciço, duro e degradado onde até mesmo a vegetação natural tem dificuldade de se estabelecer, devido à dificuldade de crescimento das raízes. Na região de Brejo, Cerrado do sul maranhense, os sistemas integrados passaram a se tornar uma estratégia às limitações físicas dos solos e uma excelente alternativa ao plantio direto, pois nesse arranjo o aporte de carbono por meio das biomassas aérea e radicular são maiores, com efeitos positivos sobre os estoques de C e a qualidade do solo. Sob essa abordagem, Barbosa et al. (2022) observaram em Argissolo Amarelo com 14% de argila maior acúmulo de C até 50 cm nos sistemas de integração lavoura-pecuária, com 2, 4 e 8 anos, quando comparados com o plantio direto e com o cerrado nativo (Tabela 6).

Tabela 5. Estoques totais de carbono orgânico (Est COT) e nitrogênio (Est NT) e taxas de emissão e de sequestro de carbono (C-CO₂) em Latossolo Amarelo, em cinco sistemas de manejo, dois períodos de coleta (chuvoso e seco) e quatro profundidades.

Sistema de manejo ⁽¹⁾	Est COT		Est NT		C-CO ₂	
	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco
	-----Mg ha ⁻¹ -----					
	Profundidade (m)					
0,00-0,05						
CN	14,41 ab	10,03 c	0,45 c	0,49 c	-	-
PC3	10,67 c	7,04 d	0,44 c	0,50 c	-4,65	-3,66
PD3	10,94 c	11,69 bc	0,62 b	0,67 b	-4,28	2,03
PD5	16,08 a	14,57 a	0,82 a	0,84 a	1,17	3,33
PD9	13,26 b	12,59 b	0,77 a	0,79 ab	-0,23	1,17
0,05-0,10						
CN	10,67 c	6,04 c	0,45 c	0,45 b	-	-
PC3	11,72 bc	7,30 c	0,49 bc	0,61 a	1,35	1,54
PD3	12,74 b	9,37 b	0,57 bc	0,61 a	2,81	4,07
PD5	15,92 a	13,72 a	0,72 a	0,69 a	3,89	5,64
PD9	13,45 b	12,86 a	0,61 ab	0,72 a	1,47	3,13

Continua...

Tabela 5. Continuação.

Sistema de manejo ⁽¹⁾	Est COT		Est NT		C-CO ₂	
	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco
	-----Mg ha ⁻¹ -----					
	Profundidade (m)					
	0,10-0,20					
CN	18,08 c	9,94 c	0,83 b	0,63 c	-	-
PC3	20,59 b	10,94 c	1,09 a	0,92 b	3,06	1,22
PD3	16,29 c	11,34 c	0,76 b	0,71 c	-2,20	1,71
PD5	21,95 ab	15,57 b	1,17 a	1,09 a	2,86	4,13
PD9	22,65 a	19,47 a	1,06 a	1,07 a	2,11	4,37
	0,20-0,40					
CN	25,68 b	16,17 c	1,19 cd	1,26 c	-	-
PC3	24,79 bc	13,18 d	1,31 bc	1,31 c	-1,20	-3,66
PD3	23,48 c	21,17 b	1,16 d	1,29 c	-2,69	6,12
PD5	29,06 a	26,02 a	1,53 a	1,83 a	2,44	7,23
PD9	26,22 b	26,75 a	1,38 b	1,64 b	0,38	4,85

⁽¹⁾CN = cerrado nativo; PC3 = plantio convencional por 3 anos; PD3 = plantio direto por 3 anos; PD5 = plantio direto por 5 anos; PD9 = plantio direto por 9 anos.

Médias seguidas de letras iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: Adaptado de Campos et al. (2013).

Tabela 6. Estoques de carbono em Argissolo Amarelo sob sistemas integrados, plantio direto e vegetação nativa na camada de 0–50 cm.

ILP2	ILP4	ILP8	PD	VN
----- Estoque de C (Mg ha⁻¹) -----				
112,3 ab	121,0 a	107,8 b	98,0 c	93,3 c

ILP = integração lavoura-pecuária com 2, 4 e 8 anos de adoção; PD = plantio direto com 14 anos de adoção; VN = vegetação nativa de cerrado.

Fonte: Adaptado de Barbosa et al. (2023).

Em um estudo realizado por Vogado et al. (2024) no Cerrado maranhense, observou-se, com o auxílio do simulador computacional Century 4.5, a influência do sistema ILPF nos estoques de C do solo. Em relação aos valores observados, constatou-se aumento dos estoques de C de 32 para 36 Mg ha⁻¹ (12,5%) após a mudança da vegetação nativa (VN) para o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (Figura 6). Quanto aos valores simulados, os estoques de C em ILPF foram de 37 Mg ha⁻¹, resultando em um erro de 2,9% ao serem comparados com o valor obtido em campo (36 Mg ha⁻¹). Com a supressão da VN para o estabelecimento do eucalipto entre 2002 e 2004, houve aumento dos estoques de 32 para 35 Mg ha⁻¹ de C, resultando em incremento anual de 1,5 Mg ha⁻¹ de C, possivelmente devido à entrada maciça de resíduos florestais no solo. Entre os anos de 2006 e 2017, prevaleceu a braquiária entre os renques de eucalipto, e nesse período, os estoques foram de 33 para 37 Mg ha⁻¹ de C, resultando em incrementos anuais de 0,33 Mg ha⁻¹ de C (Figura 6). Embora a conversão de VN em ILPF possa inicialmente levar a uma diminuição dos estoques de C do solo devido à perturbação inicial, ao longo do tempo esse sistema pode contribuir para recuperação dos estoques de C. No entanto, é importante ressaltar que é necessário realizar mais estudos com modelagem para entender completamente os efeitos do sistema ILPF na dinâmica do C do solo em longo prazo.

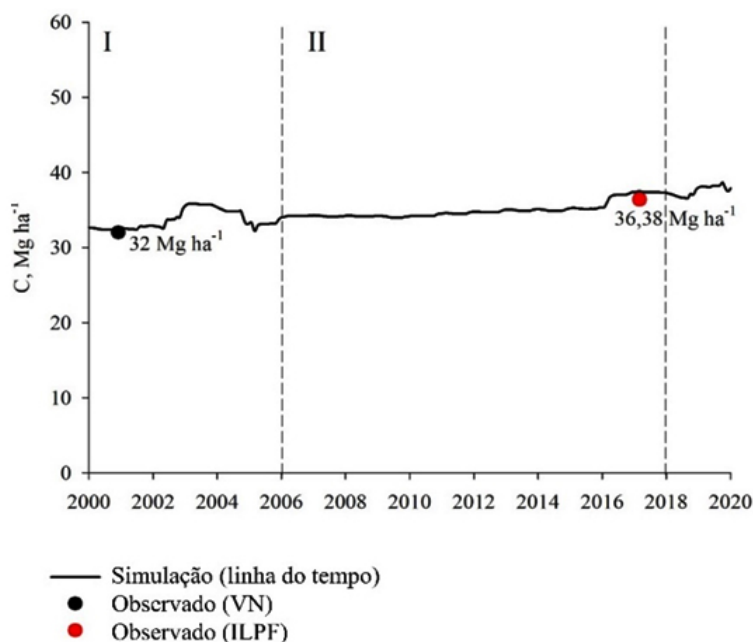


Figura 6. Evolução dos estoques de C em diferentes momentos que compreenderam o sistema ILPF simulado pelo modelo Century 4.5 e observado no campo. (I) eucalipto entre os renques: arroz (2003), soja (2004), milho (2005); (II) eucalipto entre os renques: pastagem.

No Cerrado do Piauí, em Latossolos, a adoção da ILPF tem contribuído para reconstrução da matéria orgânica por meio da palhada gerada pela pastagem e pela espécie florestal. Araújo et al. (2017) compararam integração lavoura-pecuária com pastagem contínua (ILP+P), integração lavoura-pecuária com soja (ILP+S), plantio direto com milho (PD+M), plantio convencional (PC) e cerrado nativo (CN) em três profundidades. Os autores constataram, em relação à profundidade 0,00–0,05 m, que o ILP+P foi superior em 44 e 106% ao CN e ao PC respectivamente. Quanto à profundidade 0,05–0,10 m, o destaque foi para o ILP+S, que foi superior ao CN em 61% e estocou mais C que o PC em 100%. Em relação à profundidade 0,10–0,20 m, o ILP+P foi superior em 83% ao CN e em 90% ao PC (Tabela 7). Realça-se, assim, que o uso de sistemas integrados pode promover incrementos de C no solo e consequentemente mitigar as emissões de CO₂.

Tabela 7. Estoque de carbono do solo em diferentes sistemas de manejo no Cerrado piauiense.

Sistema de manejo	Estoque de C		
	Mg ha ⁻¹		
	0,00 – 0,05	0,05 – 0,10	0,10 – 0,20
	----- m -----		
ILP+S	6,04 Ba	6,20 Ba	9,36 Ab
ILP+P	6,44 Ba	5,71 Ba	10,93 Aa
PD+M	5,23 Ba	3,75 Cb	9,21 Ab
PC	3,13 Bc	3,09 Bb	5,73 Ac
CN	4,46 Bb	3,85 Bb	5,95 Ac

PC = preparo convencional do solo; ILP + P = integração lavoura-pecuária com pastejo contínuo; ILP + S = integração lavoura-pecuária com soja; PD + M = plantio direto com milho; CN = floresta nativa do Cerrado.

Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas colunas e letra maiúscula na linha não diferem a um nível de probabilidade de 5% (teste de Scott-Knott).

Fonte: Adaptado de Araújo et al. (2017).

No mesmo ambiente de cerrado do Piauí, Gualberto et al. (2023) quantificaram estoques de carbono em áreas de pastagem (PA), plantio direto 1 (PD1 – soja sob palhada de milho e sucessão soja-milho), plantio direto 2 (PD2 – milho sob palhada de forrageira em rotação soja-milho-capim mombaça), eucalipto (EU) e cerrado nativo (CN) até a profundidade de 0,50 m. Os sistemas que mais adicionaram C ao solo foram PA e EU, apresentando valores próximos a 50 Mg ha⁻¹ e sem diferença estatística em relação ao CN (Figura 7). Isso evidencia que a adoção de práticas conservacionistas de manejo dos solos do Cerrado piauiense pode transformar áreas anteriormente fontes de C para a atmosfera em sumidouros de C. Sistemas que mantêm ou aumentam o teor de C no solo, também aumentam a capacidade de troca catiônica (CTC) e a disponibilidade de nutrientes para as plantas (Torres; Pereira, 2008; Torres et al., 2014).

Um fator a ser levado em consideração ao se observar o aumento dos estoques de C é a presença de pastagem. Os sistemas de manejo com a presença de pastagem mostram-se eficientes no acúmulo de resíduos orgânicos no solo, podendo ser justificado devido ao seu sistema radicular abundante que se renova continuamente em razão do

corte e do alto efeito rizosférico, o que favorece a estrutura do solo e a atividade da biota ao fornecer alimento e melhorar a locomoção aos organismos edáficos (Gmach et al., 2018; Liang et al., 2020). Souza et al. (2009) também relataram que a presença da pastagem pode aumentar o pH, a CTC efetiva, as bases trocáveis e os níveis de fósforo, além de reduzir a saturação por Al, promovendo, dessa forma, uma recuperação da fertilidade do solo e, conseqüentemente, transformando o ambiente favorável ao desenvolvimento das culturas agrícolas.

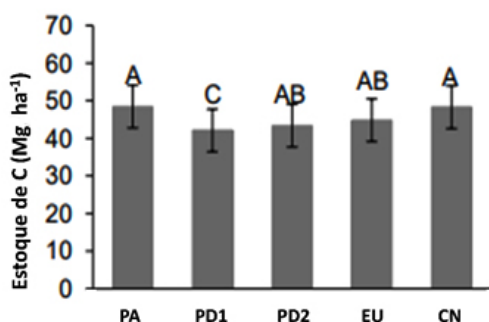


Figura 7. Estoque de C na profundidade 0,0–0,50 m em pastagem (PA), plantio direto 1 (PD1), plantio direto 2 (PD2), eucalipto (EU) e cerrado nativo (CN) no Cerrado piauiense.

Fonte: Adaptado de Gualberto (2023).

A MOS em solos e sistemas de manejo da Caatinga

A região semiárida brasileira é notadamente caracterizada pela presença da vegetação caducifólia, composta por pequenas árvores, matagais e plantas herbáceas. Os solos na área da Caatinga exibem baixos teores de C (Schulz et al., 2016). Entre as classes de solo mais prevalentes no Semiárido piauiense, destacam-se os Luvisolos, os Neossolos e os Argissolos (Araújo Filho et al., 2022), que se caracterizam por apresentar restrições ao uso agrícola (relevo ondulado, pedregosidade e má drenagem).

A conversão de áreas de caatinga natural para fins agrícolas pode acarretar impactos expressivos nas emissões de gases do efeito estufa. Os estoques de C nesse bioma podem sofrer reduções significativas, que variam entre 12 e 27%, decorrentes de práticas inadequadas de manejo do solo (Santana et al., 2019; Medeiros et al., 2020). As atividades agrícolas na Caatinga frequentemente envolvem o corte e a queima da vegetação natural, além de episódios recorrentes de sobrepastoreio. Esses fatores contribuem para a diminuição da ciclagem de nutrientes e para a redução da fertilidade do solo e aceleram os processos de degradação e desertificação do bioma Caatinga (Sá; Angelotti, 2009; Tonucci et al., 2023).

A recuperação dos conteúdos originais de carbono orgânico nos solos da Caatinga é um processo lento, estabelecido ao longo de décadas (Araújo Filho et al., 2018). A dificuldade básica de todos os sistemas de produção na Caatinga tem sido a produção média baixa e altamente variável de biomassa, resultado das condições climáticas adversas. O elemento central é a disponibilidade de água para as plantas em uma região semiárida, onde a evaporação potencial anual varia entre 1.500 e 2.500 mm e a precipitação média anual é muito baixa, entre 300 e 800 mm (Sampaio et al., 2017).

No contexto da Caatinga, a sustentabilidade da produção agrícola está intrinsecamente ligada à implementação de medidas eficazes de conservação do solo (Schulz et al., 2016). Estratégias como o controle da erosão por meio de práticas como a plantação em contorno, a fertilização com a aplicação de P e de N, a melhoria da fixação simbiótica do N, o controle integrado de pragas e doenças, a utilização de variedades e espécies aprimoradas, a adoção de sistemas agroflorestais e a aplicação de técnicas para a retenção de água são fundamentais para enfrentar os desafios impostos pelo clima semiárido e para promover a resiliência dos ecossistemas agrícolas (Sampaio et al., 2017; Tonucci et al., 2023).

Os sistemas agroflorestais, ao delinearem espacial e temporalmente diversos componentes, como estratos lenhosos, herbáceos, cultivos agrícolas e forrageiros, contribuem significativamente para o aumento das entradas de biomassa no solo (Tonucci et al., 2023). A presença de arbóreas leguminosas, como *Gliricidia sepium* e *Leucaena leucocephala*, em sistemas agroflorestais destaca-se pelo eficiente armazenamento de N e de C no solo (Muir et al., 2019; Herrera et al., 2021). O consórcio entre *Urochloa decumbens* e *Gliricidia sepium*, conforme evidenciado por Lira Junior et al. (2020), resultou em aumentos significativos da matéria orgânica, do carbono e do nitrogênio do solo, além de promover aumento da atividade microbiana do solo.

A MOS é comumente empregada como indicador de modificações no solo, em virtude de sua relação com funções ecológicas como a decomposição microbiana e a mineralização de nutrientes, especialmente aquelas resultantes de mudanças no uso do solo (Ferreira et al., 2014). Os mesmos autores, ao compararem diferentes sistemas de manejo no Semiárido

piauiense, observaram que as áreas de pastagem pastoreadas apresentaram maiores estoques de C que a área de plantio convencional de milho e até mesmo que da caatinga nativa, tanto na camada 0,0–10 m quanto na 0,10–0,20 m (Figura 8). No trabalho desenvolvido por Andrade et al. (2020), na Caatinga cearense, os autores observaram que os estoques de C na camada 0,0–0,30 m não diferiram estatisticamente entre as áreas de pastagem, de agricultura, de caatinga aberta e de caatinga densa.

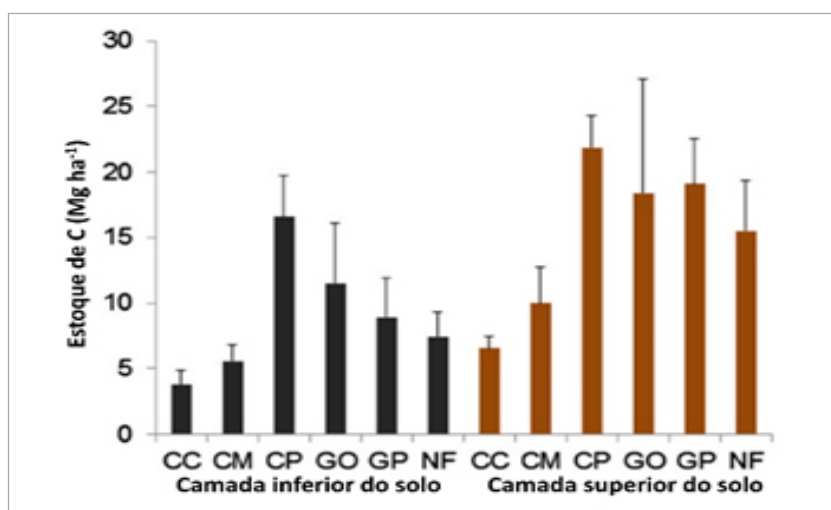


Figura 8. Efeito do uso do solo sobre os estoques de carbono orgânico do solo. NF = floresta nativa; CC = pastagem cortada; CM = área cultivada com milho; CP = área cultivada com feijão-caupi; GO = pomar de uva; GP = pastagem pastoreada).

Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2014).

É perceptível que o manejo adequado de sistemas agrícolas no bioma Caatinga pode ser benéfico ao solo, haja vista os maiores estoques de C nas áreas agrícolas em comparação à caatinga nativa. O denso sistema radicular das gramíneas é crucial no aumento das taxas de infiltração de água e na redução da erosão e da densidade do solo, mitigando as perdas de C armazenado na camada superficial do solo (Lopes et al., 2010). O C orgânico que entra no solo em áreas de pastagem é devido, principalmente, à decomposição da serapilheira na superfície (0–10 cm) e das raízes subterrâneas (20–30 cm) (Zhao et al., 2017).

Relação entre a MOS e a produtividade das culturas

Na região tropical, os rendimentos das culturas estão em curto e longo prazos positivamente associados principalmente à matéria orgânica do solo (MOS) e, portanto, a manutenção da MOS estabilizada é essencial à segurança alimentar das comunidades rurais (Sena et al., 2020). Em geral, as variações positivas da produção em função dos teores de MOS estão relacionadas à formação de melhor ambiente para o crescimento das raízes e à maior absorção principalmente da água e do nitrogênio.

No Maranhão, onde a maioria dos solos derivam de rochas sedimentares clásticas (rochas como os arenitos, formadas por grãos de minerais), com baixo teor de ferro livre, o carbono orgânico é praticamente o único componente capaz de promover as condições para o crescimento das raízes e aumentar a eficiência na absorção de nutrientes naturais ou adquiridos. Por isso, o crescimento das raízes, a absorção de nutrientes, o crescimento das plantas e a produtividade das culturas são todos altamente dependentes dos teores de matéria orgânica do solo. Decorre daí a confiança que o pousio desperta nos agricultores porque, nesse período, os níveis de MOS são naturalmente recuperados e os nutrientes derivados da cinza resultante da queima da vegetação podem, então, ser aproveitados pelas culturas.

Na Figura 9(A), podem ser vistas as propriedades do solo que mais influenciaram a produção de milho em uma lavoura no município de Brejo, MA, onde foi aplicada grande quantidade de biomassa de leguminosas arbóreas. Como pode ser verificado, a MOS explica 50% da produtividade do milho. Outra importante observação a ser feita é que todas as outras propriedades relacionadas à produtividade pertencem à dimensão física da qualidade do solo. Isso reafirma a importância dos cuidados que devem ser dedicados às melhorias das condições físicas do solo para garantir a viabilidade das lavouras nos solos da Formação Itapecuru no Maranhão. De fato, o efeito da MOS sobre o crescimento das culturas também foi confirmado por Nascimento (2022) nos Argissolos do centro-norte do Maranhão. Como pode ser verificado na Figura 9(B), 64% da produtividade do milho pode ser explicada pelo conteúdo de carbono orgânico associado aos minerais.

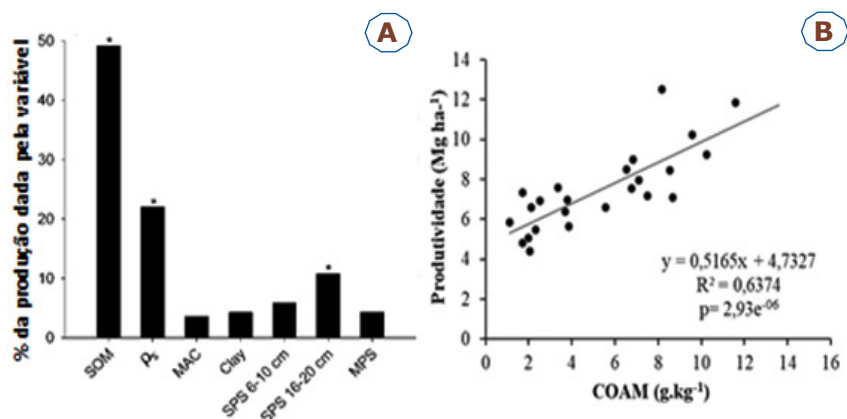


Figura 9. Porcentagens da produção de milho explicadas por: (A) propriedades do solo no município de Brejo, MA; (B) carbono orgânico associado aos minerais no município de Santa Rita, MA.

SOM = matéria orgânica do solo; ps = densidade do solo; SPS = resistência do solo à penetração; MPS = máxima resistência do solo à penetração.

Fonte: Adaptado de Moura (2021) e Nascimento (2023).

Considerações finais e perspectivas

O aumento da MOS e dos estoques de carbono no solo deve ser recomendado como uma estratégia adequada para aumentar a produtividade das culturas e emancipar os agricultores do Meio-Norte brasileiro.

Nas áreas de cerrados, é fundamental a transição dos ainda predominantes sistemas de produção convencionais para sistemas conservacionistas e integrados, como o plantio direto e a integração lavoura-pecuária-floresta, que podem reduzir substancialmente as perdas ou mesmo incrementar os estoques de carbono orgânico do solo.

É certa, no entanto, a necessidade de identificar culturas de cobertura com elevado aporte de resíduos para formação de palhada, considerando-se que o milheto e o grupo de braquiária adotado têm produzido biomassa ainda insuficiente diante das características do solo e da acelerada decomposição da matéria orgânica. Nas áreas de semiárido, os sistemas agroflorestais e as gramíneas com amplo sis-

tema radicular, que possibilitam maior acúmulo de biomassa gerado acima e abaixo do solo e aumento do armazenamento de água no solo, parecem promover um processo de reconstrução da matéria orgânica do solo.

Por outro lado, em ambientes com precipitação mais regular, como no trópico úmido do centro-norte maranhense, uma combinação de longos períodos de umidade do solo com um clima consistentemente quente durante todo o ano forma um ambiente ideal para o rápido crescimento de leguminosas adaptadas às condições tropicais. Se usada com sabedoria, essa vantagem ecológica pode produzir grande quantidade de biomassa/ha/ano. Rica em nutrientes, principalmente nitrogênio, mas também em cálcio e em potássio, essa biomassa pode ser utilizada para dar sustentabilidade ao manejo dos solos tropicais. De fato, essa é uma alternativa que permite enfrentar e vencer as forças que aceleram a degradação das terras, usando-se as próprias forças da natureza a favor da agricultura e dos agricultores.

Referências

- ANDRADE, E. M.; VALBRUN, W.; ALMEIDA, A. M. de M.; ROSA, G.; SILVA, A. G. R. da. Land-use effect on soil carbon and nitrogen stock in a seasonally dry tropical forest. **Agronomy**, v. 10, n. 2, e158, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10020158>.
- ARAÚJO FILHO, J. C. de; MARQUES, F. A.; AMARAL, A. J. do; CUNHA, T. J. F.; SOUZA JÚNIOR, V. S. de; GALVÃO, P. V. M. **Solos do Semiárido: características e estoques de carbono**. In.: GIONGO, V.; ANGELOTTI, F. (ed.). Agricultura de baixa emissão de carbono em regiões semiáridas: experiência brasileira. Brasília, DF: Embrapa, 2022. cap. 6, p. 93-112. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1150132/1/Solos-do-semiarido-2022.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2026.
- ARAÚJO FILHO, R. N. de; FREIRE, M. B. G. dos S.; WILCOX, B. P.; WEST, J. B.; FREIRE, F. J.; MARQUES, F. A. Recovery of carbon stocks in deforested caatinga dry forest soils requires at least 60 years. **Forest Ecology and Management**, v. 407, p. 210-220, 2018. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.10.002.
- ARAÚJO, F. S.; LEITE, L. F. C.; SOUZA, Z. M. de; TORRES, J. L. R.; COSTA, A. S. H. B.; FERREIRA, A. H. C. Fertility and total organic carbon in oxisol under different management systems in savannah of Piauí, Brazil. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 20, n. 1, p. 165-172, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.2282>.

- BALDOCK, J. A.; NELSON, P. N. Soil Organic Matter. In: SUMMER, M. E. (ed.). Handbook of soil science. Boca Raton, USA: CRC Press, 1999. p. B25-B84. DOI: 10.1038/194324b0.
- 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. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00049-8).
- BARBOSA, L. R.; SOUZA, H.A. de; TEIXEIRA NETO, M. L.; LEITE, L. F. C. Organic matter compartments in an Ultisol under integrated agricultural and livestock production systems in the Cerrado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 52, n. 10, e20200845, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200845>.
- BERENGUER, E.; MALHI, Y.; BRANDO, P.; CORDEIRO, A. C. N.; FERREIRA, J.; FRANÇA, F.; ROSSI, L. C.; SEIXAS, M. M. M. de; BARLOW, J. Tree growth and stem carbon accumulation in human-modified Amazonian forests following drought and fire. **Philos. Trans. R. Soc. B Biol**, v. 373, n. 1760, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0308>.
- BŁONSKA, E.; LASOTA J.; SILVA, G. R. V. da; VANGUELOVA, E.; ASHWOOD, F.; TIBBETT, M.; WATTS, K.; LUKA, M. Soil organic matter stabilization and carbon-cycling enzyme activity are affected by land management. *Ann. For. Res.*, v. 63 n. 1, p. 71-86, 2019. DOI: 10.15287/afr.2019.1837.
- BROWN, K. H.; BACH, E. M.; DRIJBER, R. A.; HOFMOCKEL, K. S.; JESKE, E. S.; SAWYER, J. E.; CASTELLANO, M. J. A long-term nitrogen fertilizer gradient has little effect on soil organic matter in a high-intensity maize production system. **Global Change Biology**, v. 20, n. 4, p. 1339-1350, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12519>.
- BUCKERIDGE, K. M.; LA ROSA, A. F.; MASON, K. E.; JEANETTE, W.; MCNAMARA, N. P.; GRANT, H. K.; NICK, J. O. Sticky dead microbes: rapid abiotic retention of microbial necromass in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 149, n. 107929, 2020. DOI: 10.1016/j.soilbio.2020.107929.
- CAMPOS, L. P.; LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.; BRASIL, E. L.; IWATA, B. de F. Estoques e funções de carbono orgânico em latossolo amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 3, p. 304-312, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000300009>.
- CASTELLANO, M. J.; MUELLER, K. E.; OLK, D. C.; SAWYER, J. E.; SIX, J. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept. **Global Change Biology**, v. 21, p. 3200-3209, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12982>.
- CHEN, R.; SENBAYRAM, M.; BLAGODATSKY, S.; MYACHINA, O.; DITTERT, K.; LIN, X.; BLAGODATSKAYA, E.; KUZYAKOV, Y. Soil C and N availability determine the priming effect: microbial N mining and stoichiometric decomposition theories. **Global Change Biology**, v. 20, n. 7, p. 2356-2367, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12475>.
- CIEMER, C.; NIKLAS, B.; HIROTA, M.; KURTHS, J. MÜLLER-HANSEN, F.; OLIVEIRA, R. S.; WINKELMANN, R. Higher resilience to climatic disturbances in tropical vegetation

exposed to more variable rainfall. **Nature Geoscience**, v. 12, p. 174-179, 2019. DOI: 10.1038/s41561-019-0312-z.

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. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>.

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

CRUSCIOL, C. A. C.; MARQUES, R. R.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; SORATTO, R. P.; COSTA, C. H. M.; FERRARI NETO, J.; CASTRO, G. S. A.; PARIZ, C. M.; CASTILHOS, A. M.; FRANZLUEBBERS, A. J. Lime and gypsum combination improves crop and forage yields and estimated meat production and revenue in a variable charge tropical soil. **Nutrient Cycling Agroecosystems**, v. 115, p. 347-372, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-019-10017-0>.

DUNGAIT, J. A. J.; HOPKINS, D. W.; GREGORY, A. S.; WHITMORE, A. P. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. **Global Change Biology**, v. 18, n. 6, p. 1781-1796, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x>.

ELLERBROCK, R. H.; GERKE, H. H. Characterization of organic matter composition of soil and flow path surfaces based on physicochemical principles—A review. **Advances in Agronomy**, v. 121, n. 5, p. 117-177, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407685-3.00003-7>.

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. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.201800093>.

FERREIRA, A. C. C.; LEITE, L. F. C.; ARAUJO, A. S. F. de; EISENHAUER, N. Land-use type effects on soil organic carbon and microbial properties in a semi-arid region of northeast Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 27, n. 2, p. 171-178, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2282>.

GMACH, M. R.; DIAS, B. O.; SILVA, C. A.; NÓBREGA, J. C. A.; LUSTOSA-FILHO, J. F.; SIQUEIRA-NETO, M. Soil organic matter dynamics and land-use change on oxisols in the cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 14, e00178, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00178>.

GOMES, D. de L. Abordagem eco fisiológica para avaliar a evolução do carbono no solo. 2023. 63 f. **Dissertação** (Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente) – Universidade Estadual do Maranhão/UEMA, Balsas.

GRANDY, A. S.; NEFF, J. C. Molecular C dynamics downstream: the biochemical decomposition sequence and its impact on soil organic matter structure and function.

Science of The Total Environment, v. 404, p. 297-307, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.11.013>.

GROFFMAN, P. M.; FISK, M. C.; DRISCOLL, C. T.; LIKENS, G. E.; FAHEY, T. J.; EAGAR, C.; PARDO, L. H. Calcium additions and microbial nitrogen cycle processes in a Northern Hardwood Forest. **Ecosystems**, v. 9, p. 1289-1305, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-006-0177-z>.

GUALBERTO, A. V. S.; SOUZA, H. A. de; SAGRILO, E.; ARAUJO, A. S. F.; MENDES, L. W.; MEDEIROS, E. V. de; PEREIRA, A. P. de A.; COSTA, D. P. da; VOGADO, R. F.; CUNHA, J. R. da; TEIXEIRA, M. L.; LEITE, L. F. C. Organic C Fractions in Topsoil under Different Management Systems in Northeastern Brazil. **Soil Syst.**, v. 7, n. 11, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010011>.

HERRERA, A. M.; DE MELLO, A. C. L.; APOLINÁRIO, V. X. O.; DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; CUNHA, M. V.; DOS SANTOS, M. V. F. Potential of *Gliricidia sepium* (jacq.) Kunth ex Walp. and *Mimosa caesalpinhiifolia* Benth. in silvopastoral systems intercropped with signalgrass [*Urochloa decumbens* (Stapf) RD Webster]. **Agroforest Systems**, v. 95, p. 1061-1072, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00625-7>.

HOBBIE, S. E.; MILEY, T. A.; WEISS, M. S. Carbon and nitrogen cycling in soils from acidic and nonacidic tundra with different glacial histories in Northern Alaska. **Ecosystems**, v. 5, p. 0761-0774, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-002-0185-6>.

JOHNSON, D. W. Role of Carbon in the Cycling of Other Nutrients in Forested Ecosystems. In: McFee, W. W.; Kelly, J. M. (ed.). *Carbon Forms and Functions in Forest Soils*. **Soil Science Society of America, Inc.**, p. 299-328, 1995. DOI: 10.2136/1995.carbonforms.

KANNAN, R.; SOLAIMALAI, A.; ANADAN, P.; RAJ, T. S. Uses of Mulching in Agriculture: A Review. In: RAM, L. R. **Current Research in Soil Fertility**. Akiniki Publication, New Delhi, cap. 1, p.1-32, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Chandrakala-M-2/publication/339676193_Gully_Erosion_and_Land_Degradation/links/5e5f55e34585152ce805029f/Gully-Erosion-and-Land-Degradation.pdf#page=5. Acesso em: 09 fev. 2026.

KLEBER, M.; EUSTERHUES, K.; KEILUWEIT, M.; MIKUTTA, C.; MIKUTTA, R.; NICO, P. S. Mineral–organic associations: formation, properties, and relevance in soil environments. **Advances in Agronomy**, v. 130, cap. 1, p. 1-140, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.005>.

KOOL, D. M.; CHUNG, H.; TATE, K. R.; ROSS, D. J.; NEWTON, P. C. D.; SIX, J. Hierarchical saturation of soil carbon pools near a natural CO² spring. **Global Change Biology**, v. 13, n. 6, p. 1282-1293, 2007. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2007.01362.x.

KOPITTKE, P. M. BERHE A.A.; CARRILO, Y.; CAVAGNARO, T. R.; CHEN, D.; CHEN, Q. L.; DOBARCO, R. D.; DIJKSTRA, F. A.; FIELD, D. J.; GRUNDY, M. J.; JI-ZHENG, H.; HOYLE, F. C.; KÖGEL-KNABNER, I.; LAM, S. K.; MARSCHNER, P.; MARTINEZ, C.; MCBRATNEY, A. B.; McDONALD-MADDEN, E.; MENZIES, N. W.; MOSLEY, L. M.; MUELLER, C. W.; MURPHY, D. V.; NIELSEN, U. N.; O'DONNELL, A. G.; PENDALL, E.; PETT-RIDGE, J.;

RUMPEL, C.; YOUNG, I. M.; MINASNY, B. Ensuring planetary survival: the centrality of organic carbon in balancing the multifunctional nature of soils. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 52, n. 23, p. 4308-4324, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.2024484>.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 261-273, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>.

LEITE, L. F. C.; IWATA, B. F.; ARAUJO, A. S. F. Soil organic matter pools in a tropical savanna under agroforestry system in Northeastern Brazil. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 38, n. 4, p. 711-723, 2014. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1021604/1/ArtigoLuizFernandoRevistaArvore2014.pdf>. Acesso em: 09 fev. 2026.

LIANG, C.; AMELUNG, W.; LEHMANN, J.; KÄSTNER, M. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter. **Global Change Biology**, v. 25, n. 11, p. 3578-3590, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14781>.

LIÁNG, L. L.; KIRSCHBAUM, M. U. F.; GILTRAP, D. L.; WALL, A. M.; CAMPBELL, D. I. Modelling the effects of pasture renewal on the carbon balance of grazed pastures. **Science of The Total Environment**, v. 715, e136917, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136917>.

LIRA JUNIOR, M. A.; FRACETTO, F. J. C.; FERREIRA, J. da S.; SILVA, M. B.; FRACETTO, G. M. Legume silvopastoral systems enhance soil organic matter quality in a subhumid tropical environment. **Soil Science Society of America Journal**, v. 84, p. 1209-1218, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20106>.

LOPES, M. M.; SALVIANO, A. A. C.; ARAÚJO, A. S. F.; NUNES, L. A. P. L.; OLIVEIRA, M. E. Changes in soil microbial biomass and activity in different Brazilian pastures. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 8, n. 4, p. 1253-1259, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5424/sjar/2010084-1411>.

MEDEIROS, A. de S.; MAIA, S. M. F.; SANTOS, T. C. dos; GOMES, T. C. de A. Losses and gains of soil organic carbon in grasslands in the Brazilian semi-arid region. **Scientia Agricola**, v. 78, n. 3, e20190076, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2019-0076>.

MINICK, K. J.; FISK, M. C.; GROFFMAN, P. M. Soil Ca alters processes contributing to C and N retention in the Oa/A Horizon of a northern hardwood forest. **Biogeochemistry**, v. 132, p. 343-357, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0307-z>.

MOORE, T. R.; TURUNEN, J. Carbon Accumulation and Storage in Mineral Subsoil beneath Peat. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 2, p. 690-696, 2004. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.6900>.

MOURA, E. G. de. **Entre a agricultura e a ecologia: uma interface por onde transita a emancipação dos agricultores do trópico úmido**. 1. ed. São Luís: Universidade Estadual do Maranhão, PPGA, UEMA, 2021. 264 p.

- MOURA, E. G. de; PORTELA, S. B.; MACEDO, V. R. A.; SENA, V. G. L.; SOUSA, C. C. M.; AGUIAR, A. das 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10041006>.
- MOURA, E. G. de; SOUSA, R. M. de; CAMPOS, L. S.; CARDOSO-SILVA, A. J.; MOONEY, S. J.; AGUIAR, A. das 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, 107723, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107723>.
- MUIR, J. P.; DUBEUX JÚNIOR, J. C. B. Arboreal legumes for multiple uses. **Legume Perspectives**, n. 17, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Marcelo_Carvalho8/publication/335274196_Biodiversity_and_genetic_resources_of_forage_legumes_in_Brazil/links/5d5c24d3a6fdcc55e81b6caf/Biodiversity-and-genetic-resources-of-forage-legumes-in-Brazil.pdf#page=10. Acesso em: 10 fev. 2026.
- MUSTAFA, A.; SAEED, Q.; NEZHAD, M. T. K.; NAN, S.; HONGJUN, G.; PING, Z.; NAVEED, M.; MINGGANG, X.; NEZ-DELGADO, A. N. Physically separated soil organic matter pools as indicators of carbon and nitrogen change under long-term fertilization in a Chinese Mollisol. **Environmental Research**, v. 216, 114626, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114626>.
- NASCIMENTO, K. P. M. Indicadores de fertilidade do solo do trópico úmido que determinam a produtividade das culturas. 2022. 55 f. **Dissertação** (Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente) – Universidade Estadual do Maranhão/UEMA, Balsas. Disponível em: <https://www.ppgaa.uema.br/wp-content/uploads/2018/02/Dissertação-final-Kalyne.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2026.
- OADES, J. M. The retention of organic matter in soils. **Biogeochemistry**, v. 5, p. 35-70, 1988. DOI: 10.1007/BF02180317.
- PARTON, W.; SILVER, W. L.; BURKE, I. C.; GRASSENS, L.; HARMON, M. B.; CURRIE, W. S.; KING, J. Y.; ADAIR, E. C.; BRANDT, L. A.; HART, S. C.; FASTH, B. Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. **Science**, v. 315, n. 5810, p. 361-364, 2007. DOI: 10.1126/science.1134853.
- POEPLAU, C.; DON, A.; SIX, J.; KAISER, M.; Benbi, D.; Chenu, C.; Cotrufo, M. F.; DERRIEN, D.; GIOACCHINI, P.; GRAND, S.; GREGORICH, E.; GRIEPENTROG, M.; GUNINA, A.; HADDIX, M.; KUZYAKOV, Y.; KÜHNEL, A.; MACDONALD, L. M.; SOONG, J.; TRIGALET, S.; VERMEIRE, M. L.; ROVIRA, P.; WESEMAEL, B. van; WIESMEIER, M.; YEASMIN, S.; YEVDOKIMOV, I.; NIEDER, R. Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 125, p. 10-26, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.06.025>.
- PRESCOTT, C. E. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? **Biogeochemistry**, v. 101, p. 133-149, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9439-0>.
- PRESTON, C. M.; NAULT, J. R.; TROFYMOW, J. A. Chemical changes during 6 years of decomposition of 11 litters in some canadian forest sites. Part 2. ¹³C abundance, solid-

state ^{13}C NMR spectroscopy and the meaning of “lignin”. **Ecosystems**, v. 12, p. 1078-1102, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-009-9267-z>.

PUTTASO, A.; VITYAKON P.; RASCHE, F.; SAENJAN, P.; TRELOGES, V.; CADISCH, G. Does organic residue quality influence carbon retention in a tropical sandy soil? **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 3, p. 1001-1011, 2013. DOI: 10.2136/SSAJ2012.0209.

QUESADA, C. A.; PAZ, C.; MENDOZA, E. O.; 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. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-6-53-2020>.

RAMOS, F. T.; DORES, E. F. G. C.; WEBER, O. L. dos S.; BEBER, D. C.; CAMPELO Jr, J. H.; MAIA, J. C. de S. Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n. 9, p. 3595-3602, 2018. DOI: 10.1002/jsfa.8881.

ROCCI, K. S.; LAVALLEE, J. M.; STEWART, C. E.; COTRUFO, M. F. Soil organic carbon response to global environmental change depends on its distribution between mineral-associated and particulate organic matter: a meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 793, e148569, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148569>.

ROWLEY, M. C.; GRAND, S.; VERRECCHIA, E. P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. **Biogeochemistry**, v. 137, p. 27-49, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0410-1>.

RUMPEL, C.; AMIRASLANI, F.; BOSSIO, D.; CHENUD, C.; HENRYE, H.; ESPINOZAF, A. F.; KOUTIKAG, L. S.; LADHAH, J.; MADARII, B.; MINASNY, B.; OLALEYEK, A. O.; SHIRATOL, Y.; SALL, S. N.; SOUSSANAN, J. F.; VARELA-ORTEGA, C. The role of soil carbon sequestration in enhancing human resilience in tackling global crises including pandemics. **Soil Security**, v. 8, 100069, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100069>.

SA, I. B.; ANGELOTTI, F. **Degradação ambiental e desertificação no Semi-Árido brasileiro**. In: ANGELOTTI, F.; SÁ, I. B.; MENEZES, E. A.; PELLEGRINO, G. Q. (ed.). Mudanças climáticas e desertificação no Semi-Árido brasileiro. Petrolina: Embrapa Semi-Árido; Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2009. cap. 4, p. 53-76.

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. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000031>.

SAMPAIO, E. V. de S. B.; MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, Y. de S. B.; FREITAS, A. D. S. de. **Sustainable Agricultural Uses in the Caatinga**. In: SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. (ed.). Caatinga. **Springer, Cham**, p. 413-428, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_16.

SANTANA, M. da S.; SAMPAIO, E. V. de S. B.; GIONGO, V.; MENEZES, R. S. C.; JESUS, K. N. de; ALBUQUERQUE, E. R. G. M. de; NASCIMENTO, D. M. do; PAREYN, F. G. C.; CUNHA,

- T. J. F.; SAMPAIO, R. M. B.; PRIMO, D. C. Carbon and nitrogen stocks of soils under different land uses in Pernambuco state, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 16, e00205, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00205>.
- SARKER, J. R.; SINGH, B. P.; HE, X.; FANG, Y.; LI, G. D.; COLLINS, D.; COWIE, A. L. Tillage and nitrogen fertilization enhanced belowground carbon allocation and plant nitrogen uptake in a semi-arid canola crop-soil system. **Scientific Reports**, v. 7, 10726, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11190-4>.
- SCHMIDT, M. W. I.; TORN, M. S.; ABIVEN, S.; DITTMAR, T.; GUGGENBERGER, G.; JANSSENS, I. A.; KLEBER, M.; KÖGEL-KNABNER, I.; LEHMANN, J.; MANNING, D. A. C.; NANNIPIERI, P.; RASSE, D. P.; WEINER, S.; TRUMBORE, S. E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**, v. 478, p. 49-56, 2011. DOI: 10.1038/nature10386.
- SCHULZ, K.; VOIGT, K.; BEUSCH, C.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S.; KOWARIK, I.; WALZ, A.; CIERJACKS, A. Grazing deteriorates the soil carbon stocks of Caatinga forest ecosystems in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 367, p. 62-70, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.011>.
- SENA, V. G. L.; MOURA, E. G. de; MACEDO, V. R. A.; AGUIAR, A. C. F.; 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, e03028, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.3028>.
- SIMPSON, J. E.; SLADE, E.; RIUTTA, T.; TAYLOR, M. E. Factors Affecting Soil Fauna Feeding Activity in a Fragmented Lowland Temperate Deciduous Woodland. **PLOS ONE**, v. 7, n. 1, e29616, Jan. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029616>.
- 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. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00036-5).
- SOLLINS, P.; SWANSTON, C.; KRAMER, M. Stabilization and destabilization of soil organic matter—a new focus. **Biogeochemistry**, v. 85, p. 1-7, 2007. DOI: 10.1007/S10533-007-9099-X.
- TIAN, G.; BRUSSAARD, L.; KANG, B. T. Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions: effects on soil fauna. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, n. 6, p. 731-737, 1993. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90114-Q](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90114-Q).
- TRIVEDI, P.; SINGH, B. P.; SINGH, B. K. Soil carbon: introduction, importance, status, threat, and mitigation. In: SINGH, B. K. (ed.). Soil carbon storage: modulators, mechanisms and modeling. 1.ed. [S.l.]: Elsevier, 2018. cap. 1, p. 1-28. E-book. DOI: 10.1016/C2016-0-03949-9.
- TONUCCI, R. G.; VOGADO, R. F.; SILVA, R. D.; POMPEU, R. C. F. F.; ODA-SOUZA, M.; SOUZA, H. A. de. Agroforestry system improves soil carbon and nitrogen stocks in depth after land-use changes in the Brazilian semi-arid region. **Revista**

Brasileira de Ciência do Solo, v. 47, e0220124, 2023. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220124>.

TORRES, J. L. R.; CUNHA, M. de A.; PEREIRA, M. G.; VIEIRA, D. M. da S. Cultivo de feijão e milho em sucessão a plantas de cobertura. **Revista Caatinga**, v. 27, n. 4, p. 117-125, out./dez. 2014. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/2371/237132753015.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2026.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G. Dinâmica do potássio nos resíduos vegetais de plantas de cobertura no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1609-1618, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000400025>.

TOTSCHKE, K. U.; AMELUNG, W.; GERZABEK, M. H.; GUGGENBERGER, G.; KLUMPP, E.; KNIEF, C.; LEHNDORFF, E.; MIKUTTA, R.; PETH, S.; PRECHTEL, A.; RAY, N.; KÖGEL-KNABNER, I. Microaggregates in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 181, p. 104-136, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.201600451>.

VOGADO R. F.; SOUZA, H. A. de; ALTHOFF, T. D.; MENEZES, R. S. C.; GUALBERTO, A. V. S.; CUNHA, J. R. da.; LEITE, L. F. C. Simulating soil carbon and nitrogen trends under an integrated system in the Brazilian Cerrado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 46, e62574, 2024. DOI: 10.4025/actasciagron.v46i1.62574.

LÜTZOW, M. von; KÖGEL-KNABNER, I.; EKSCHMITT, K.; MATZNER, E.; GUGGENBERGER, G.; MARSCHNER, B.; FLESS, H. 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. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x.

LÜTZOW, M. von; KÖGEL-KNABNER, I.; LUDWIG, B.; MATZNER, E.; FLESSA, H.; EKSCHMITT, K.; GUGGENBERGER, G.; MARSCHNER, B.; KALBITZ, K. Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: development and application of a conceptual model. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 1, p. 111-124, 2008. DOI: 10.1002/JPLN.200700047.

WHALEN, J. K.; SAMPEDRO, L. Soil Ecology and Management. [S.l.]: CABI, 2010.

WILLIS, R. J. The historical bases of the concept of allelopathy. **Journal of the History of Biology**, v. 18, n. 1, p. 71-102, 1985. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00127958>.

WHITTINGHILL, K. A.; HOBBIE, S. E. Effects of pH and calcium on soil organic matter dynamics in Alaskan tundra. **Biogeochemistry**, v. 111, p. 569-581, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9688-6>.

ZHAO, Y.; DING, Y.; HOU, X.; LI, F. Y.; HAN, W.; YUN, X. Effects of temperature and grazing on soil organic carbon storage in grasslands along the Eurasian steppe eastern transect. **PLoS ONE**, v. 12, e0186980, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186980>.